



**TUGAS AKHIR - TF 141581**

**PEMODELAN KONDISI OPERASI PVT  
*STEAM INJECTION* PADA PROSES  
*ENHANCED OIL RECOVERY* DENGAN  
METODE *LATTICE BOLTZMANN* DAN  
*COMSOL SOFTWARE***

**ANDIKA DWIPARANA SUHERMAN NATAWIRIA**  
NRP. 2411 100 116

Dosen Pembimbing  
Totok Ruki Biyanto, Ph.D

JURUSAN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**FINAL PROJECT - TF 141581**

**OPERATING CONDITION PVT MODEL OF  
STEAM INJECTION IN ENHANCED OIL  
RECOVERY PROCESS USING LATTICE  
BOLTZMANN METHOD AND COMSOL  
SOFTWARE**

**ANDIKA DWIPARANA SUHERMAN NATAWIRIA**  
NRP. 2411 100 116

Supervisor  
Totok Ruki Biyanto, Ph.D

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015

## LEMBAR PENGESAHAN

### **PEMODELAN KONDISI OPERASI PVT *STEAM* *INJECTION* PADA PROSES *ENHANCED OIL RECOVERY* DENGAN METODE *LATTICE BOLTZMANN* DAN *COMSOL SOFTWARE***

#### **TUGAS AKHIR**

Oleh :

Andika Dwiparana Suherman Natawiria

**NRP : 2411 100 116**

**Surabaya, 10 Juli 2015**

**Mengetahui/Menyetujui**

**Pembimbing**



**Totok Ruki Biyanto, PhD**

**NIPN. 19710702 199802 1 001**

**Ketua Jurusan  
Teknik Fisika FTI-ITS**



**Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA**

**NIPN. 19650309 199002 1 001**



## LEMBAR PENGESAHAN

### **PEMODELAN KONDISI OPERASI PVT STEAM INJECTION PADA PROSES ENHANCED OIL RECOVERY DENGAN METODE LATTICE BOLTZMANN DAN COMSOL SOFTWARE**


#### **TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**ANDIKA DWIPARANA SUHERMAN NATAWIRIA**  
NRP. 2410 100 116

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Totok Ruki Biyanto, PhD ..... (Pembimbing)
2. Ir. Ya'umar, M.T. .... (Ketua Penguji)
3. Ir. Tutug Dhanardono, M.T.  ..... (Penguji 1)
4. Dr. Gunawan Nugroho, M.T. .... (Penguji 2)

**SURABAYA**  
**Juli 2015**

**PEMODELAN KONDISI OPERASI PVT *STEAM*  
INJECTION PADA PROSES *ENHANCED OIL RECOVERY*  
DENGAN METODE *LATTICE BOLTZMANN* DAN  
COMSOL SOFTWARE**

**Nama Mahasiswa** : Andika Dwiparana S. Natawiria  
**NRP** : 24 11 100 116  
**Jurusan** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Totok Ruki Biyanto, PhD

**Abstrak**

Pemodelan kondisi operasi PVT injeksi uap pada proses *enhanced oil recovery* diperlukan untuk memprediksi tekanan, temperatur, dan besaran lainnya. Pemodelan ini dilakukan agar dapat menentukan kualitas steam dan kesuksesan *enhanced oil recovery* dalam tingkat produktifitas minyak yang dapat di produksi kembali serta meminimalisir biaya. Pada tugas akhir ini, dilakukan pemodelan kondisi operasi *pressure* dan *temperature* menggunakan metode *lattice Boltzmann* dan perangkat lunak COMSOL. *Pressure* dan *temperature outlet* diprediksi untuk dapat mengetahui penurunan *pressure* atau *temperature* yang terjadi pada batuan. Langkah awal yang dilakukan adalah pemodelan dengan menggunakan *lattice Boltzmann*, dimana bentuk *rectangle* dipergunakan dan tiap node diberikan distribusi fungsi. Selanjutnya dilakukan pemodelan dengan menggunakan perangkat lunak COMSOL, perangkat lunak ini menggunakan hukum *darcy* yang terintegrasi di dalamnya. Langkah terakhir adalah memvalidasi pemodelan dengan eksperimen yang dilakukan di laboratorium Universiti Teknologi PETRONAS dengan menggunakan *steam injector* dan batuan Berea *sandstone*, yang memiliki permeabilitas 1250mD dan *porosity* 0.22. Hasil yang didapatkan dari kedua metode ini yaitu besar *pressure outlet* dan *temperature outlet* yang dibandingkan dengan outlet eksperimen. Besar outlet dari metode dan eksperimen yang sudah didapat dicari nilai *root mean square error* (RMSE). RSME ini yang dijadikan patokan agar model ini dapat dikatakan valid atau tidak untuk proses *steam injection*.

**Kata Kunci:** *Steam injection, lattice boltzmann, PVT, COMSOL*



# **OPERATING CONDITION PVT MODEL OF STEAM INJECTION IN ENHANCED OIL RECOVERY PROCESS USING LATTICE BOLTZMANN METHOD AND COMSOL SOFTWARE**

***Name*** : ***Andika Dwiparana Suherman Natawiria***  
***NRP*** : ***24 11 100 116***  
***Department*** : ***Department of Engineering Physics***  
***Supervisor*** : ***Totok Ruki Biyanto, PhD***

## ***Abstract***

*Steam Injection PVT operating condition modeling in enhanced oil recovery process is needed to perform pressure, temperature, and other physical variable prediction. This model was created to determine steam quality and success rate of enhanced oil recovery in oil productivity rate and minimize the cost. In this final undergraduate thesis, the operating condition of pressure and temperature utilized lattice boltzmann method and COMSOL software. Pressure and temperature outlet was predicted to understand the pressure drop or decreasing temperature that happened in the reservoir. The first step that performed in this final thesis is modeling using lattice boltzmann, where rectangle form utilized and distribution function is given to each node. Then, modeling performed using COMSOL software, this software utilized Darcy's law that has been integrated inside the software. Last step is modeling validation with experiment that performed in laboratory of Universiti Teknologi PETRONAS using steam injector and Berea sandstone that has permeability of 1250mD and porosity 0,22. The result that achieved from these two methods are pressure and temperature outlet that compared with experiment result. Root mean square error (RMSE) is analyzed based on the result that achieved from experiment and methods. This RMSE used as foundation for the validation model with experiment.*

***Keywords:*** ***Steam injection, lattice boltzmann, PVT, COMSOL***





## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah S.W.T, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini. Tidak lupa juga penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada keluarga dan para sahabat. Oleh karena dukungan mereka, penulis mampu menyusun laporan tugas akhir yang berjudul:

### **“PEMODELAN KONDISI OPERASI PVT *STEAM* INJECTION PADA PROSES *ENHANCED OIL RECOVERY* DENGAN METODE *LATTICE BOLTZMANN* DAN *COMSOL SOFTWARE*”**

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam Program Studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Totok Ruki Biyanto, Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir ini, yang selalu memberikan semangat dan ide-ide baru.
2. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA. selaku ketua jurusan Teknik Fisika ITS sekaligus penguji tugas akhir saya.
3. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di jurusan Teknik Fisika - ITS.
4. Segenap keluarga penulis yang telah memberikan dukungan penuh terhadap penyelesaian tugas akhir ini.
5. Rekan-rekan F46 dan warga Teknik Fisika - ITS, yang senantiasa memberikan motivasi dan perhatian.
6. Rekan-rekan dan laboran dari Laboratorium Rekayasa Instrumentasi Teknik Fisika - ITS.
7. Hiskia dan teman-teman seperjuangan TA yang telah memotivasi dan memberikan bantuan dalam penyelesaian laporan tugas akhir ini.
8. Teman-teman seperkumpulan di Taiba, Ega, Amir, Rehan, Danang, dan Fanani serta organisasi di luar kampus yang membuat saya semangat untuk terus menyelesaikan tugas akhir ini

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 10 Juli 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. <i>Scope of Work</i> .....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Enhanced Oil Recovery (EOR)</i> .....	3
2.2. <i>Heavy Oil Recovery</i> dengan Proses <i>Steam Injection</i> .....	4
2.3. Aliran Fluida dan Perpindahan Panas pada <i>porous medium</i> .....	4
2.4. Persamaan <i>Darcy</i> dan Permeabilitas .....	5
2.5. <i>Dimensionless Number</i> .....	7
2.6. <i>Lattice Boltzmann</i> .....	11
2.7. <i>Distribution Function</i> .....	13
2.8. <i>Node</i> pada Metode <i>Lattice Boltzmann</i> .....	13
2.9. Persamaan <i>Heat Transfer</i> dengan <i>Lattice Boltzmann</i> ...	14
2.10. Persamaan <i>Pressure</i> dari Hukum <i>Darcy</i> .....	21
2.11. Perangkat Lunak COMSOL <i>Multiphysics</i> .....	22
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>25</b>
3.1. Pengumpulan Data.....	26
3.2. Pemodelan Kondisi Operasi <i>Steam Injection</i> dengan <i>Lattice Boltzmann</i> .....	27

3.3.	Pemodelan Kondisi Operasi <i>Steam Injection</i> dengan COMSOL <i>Multiphysics</i> .....	28
3.4.	Proses Validasi dengan Data Eksperimen .....	29
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>31</b>
4.1.	Hasil Simulasi MATLAB .....	31
4.2.	Hasil Simulasi COMSOL .....	39
4.3.	Validasi Model dengan Eksperimen .....	41
4.4.	Hasil <i>Sensitivity Analysis</i> terhadap Variabel <i>Length</i> , <i>Porosity</i> , dan <i>Permeability</i> .....	46
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>53</b>
5.1.	Kesimpulan .....	53
5.2.	Saran .....	54

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1.</b> <i>Prandtl Number</i> .....	10
<b>Tabel 2. 2.</b> <i>Nusselt Number</i> .....	11
<b>Tabel 2. 3.</b> Detil data D2Q9 pada <i>lattice boltzmann</i> .....	18
<b>Tabel 3. 1.</b> <i>Inlet Pressure</i> dan <i>Temperature Steam Injection</i> .....	26
<b>Tabel 3. 2.</b> Daftar <i>dimensionless number</i> yang telah dikalkulasi .....	27
<b>Tabel 3. 3.</b> Properti <i>steam</i> dan <i>sandstone</i> pada COMSOL .....	28
<b>Tabel 4. 1.</b> Validasi model dengan eksperimen .....	42
<b>Tabel 4. 2.</b> Tabel <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE) antara pemodelan dan eksperimen .....	45
<b>Tabel 4. 3.</b> Tabel <i>sensitivity analysis</i> terhadap pertambahan <i>length</i> .....	46
<b>Tabel 4. 4.</b> Tabel <i>sensitivity analysis</i> terhadap pertambahan besar <i>porosity</i> .....	48
<b>Tabel 4. 5.</b> Tabel <i>sensitivity analysis</i> terhadap pertambahan besar <i>permeability</i> .....	50



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1.</b>	Proses injeksi <i>steam</i> pada <i>reservoir</i> .....	3
<b>Gambar 2. 2.</b>	Gambaran <i>porous medium</i> .....	4
<b>Gambar 2. 3.</b>	Skematik <i>Core Holder</i> .....	7
<b>Gambar 2. 4.</b>	<i>Square Lattice</i> - model <i>node rectangle</i> .....	12
<b>Gambar 2. 5.</b>	(a) gambar struktur di dalam <i>porous medium</i> , (b) <i>node Lattice</i> berupa titik-titik di tengah area berwarna putih .....	14
<b>Gambar 2. 6.</b>	(a) Proses metode <i>lattice boltzmann</i> yang berjalan setelah iterasi (b) Skema <i>lattice</i> <i>boltzmann</i> pada sebuah <i>medium</i> .....	16
<b>Gambar 2. 8.</b>	Perangkat lunak COMSOL <i>multiphysics</i> .....	23
<b>Gambar 3. 1.</b>	Diagram alir penelitian .....	25
<b>Gambar 4. 1.</b>	(a) Pada <i>T inlet</i> 300°C grafik <i>temperature</i> menunjukkan besar <i>T outlet</i> 279.70°C pada titik 12 cm. (b) Pada <i>P inlet</i> 1500 psi grafik <i>pressure</i> menunjukkan besar <i>P outlet</i> 1497.12 psi .....	31
<b>Gambar 4. 2.</b>	(a) Pada <i>T inlet</i> 300°C grafik <i>temperature</i> menunjukkan besar <i>T outlet</i> 276.15°C pada titik 12 cm. (b) Pada <i>P inlet</i> 1250 psi grafik <i>pressure</i> menunjukkan besar <i>P outlet</i> 1247.04 psi .....	32
<b>Gambar 4. 3.</b>	(a) Pada <i>T inlet</i> 300°C grafik <i>temperature</i> menunjukkan besar <i>T outlet</i> 275.50°C pada titik 12 cm. (b) Pada <i>P inlet</i> 1000 psi grafik <i>pressure</i> menunjukkan besar <i>P outlet</i> 1987.38 psi .....	33
<b>Gambar 4. 4.</b>	(a) Pada <i>T inlet</i> 250°C grafik <i>temperature</i> menunjukkan besar <i>T outlet</i> 248.47°C pada titik 12 cm. (b) Pada <i>P inlet</i> 1500 psi grafik <i>pressure</i> menunjukkan besar <i>P outlet</i> 1497.40 psi .....	34



<b>Gambar 4. 5.</b>	(a) Pada $T_{inlet}$ $250^{\circ}\text{C}$ grafik <i>temperature</i> menunjukkan besar $T_{outlet}$ $248.42^{\circ}\text{C}$ pada titik 12 cm. (b) Pada $P_{inlet}$ 1250 psi grafik <i>pressure</i> menunjukkan besar $P_{outlet}$ 1247.44 psi.....	35
<b>Gambar 4. 6.</b>	(a) Pada $T_{inlet}$ $250^{\circ}\text{C}$ grafik <i>temperature</i> menunjukkan besar $T_{outlet}$ $245.7^{\circ}\text{C}$ pada titik 12 cm. (b) Pada $P_{inlet}$ 1000 psi grafik <i>pressure</i> menunjukkan besar $P_{outlet}$ 985.06 psi.....	36
<b>Gambar 4. 7.</b>	(a) Pada $T_{inlet}$ $200^{\circ}\text{C}$ grafik <i>temperature</i> menunjukkan besar $T_{outlet}$ $196.55^{\circ}\text{C}$ pada titik 12 cm. (b) Pada $P_{inlet}$ 1500 psi grafik <i>pressure</i> menunjukkan besar $P_{outlet}$ 1497.70 psi.....	37
<b>Gambar 4. 8.</b>	(a) Pada $T_{inlet}$ $200^{\circ}\text{C}$ grafik <i>temperature</i> menunjukkan besar $T_{outlet}$ $196.42^{\circ}\text{C}$ pada titik 12 cm. (b) Pada $P_{inlet}$ 1250 psi grafik <i>pressure</i> menunjukkan besar $P_{outlet}$ 1247.70 psi.....	38
<b>Gambar 4. 9.</b>	(a) Pada $T_{inlet}$ $200^{\circ}\text{C}$ grafik <i>temperature</i> menunjukkan besar $T_{outlet}$ $196.35^{\circ}\text{C}$ pada titik 12 cm. (b) Pada $P_{inlet}$ 1000 psi grafik <i>pressure</i> menunjukkan besar $P_{outlet}$ 997.67 psi.....	39
<b>Gambar 4. 10.</b>	Pada $T_{inlet}$ $300^{\circ}\text{C}$ dan $P_{inlet}$ 1500 psi grafik <i>pressure</i> menunjukkan penurunan dengan besar $P_{outlet}$ 1481.2 psi.....	40
<b>Gambar 4. 11.</b>	Pada $T_{inlet}$ $300^{\circ}\text{C}$ dan $P_{inlet}$ 1500 psi grafik <i>temperature</i> menunjukkan penurunan dengan besar $T_{outlet}$ $297.49^{\circ}\text{C}$ .....	41
<b>Gambar 4. 12.</b>	Grafik perbandingan pemodelan dan eksperimen <i>pressure</i> pada <i>lattice boltzman</i> ...	43

<b>Gambar 4. 13.</b>	Grafik perbandingan pemodelan dan eksperimen <i>temperature</i> pada <i>lattice boltzmann</i> .....	43
<b>Gambar 4. 14.</b>	Grafik perbandingan pemodelan dan eksperimen <i>pressure</i> pada COMSOL .....	44
<b>Gambar 4. 15.</b>	Grafik perbandingan pemodelan dan eksperimen <i>temperature</i> pada COMSOL.....	44
<b>Gambar 4. 16.</b>	Grafik <i>sensitivity analysis temperature</i> dengan <i>length</i> .....	47
<b>Gambar 4. 17.</b>	Grafik <i>sensitivity analysis pressure</i> dengan <i>length</i> .....	47
<b>Gambar 4. 18.</b>	Grafik <i>sensitivity analysis temperature</i> dengan <i>porosity</i> .....	49
<b>Gambar 4. 19.</b>	Grafik <i>sensitivity analysis pressure</i> dengan <i>porosity</i> .....	49
<b>Gambar 4. 20.</b>	Grafik <i>sensitivity analysis temperature</i> dengan <i>permeability</i> .....	51
<b>Gambar 4. 21.</b>	Grafik <i>sensitivity analysis pressure</i> dengan <i>permeability</i> .....	51

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang**

*Enhanced Oil Recovery* (EOR) adalah suatu metode yang digunakan untuk meningkatkan produksi minyak pada suatu sumur dengan cara menurunkan viskositas minyak berat yang masih tertahan di dalam batuan atau *reservoir*. Metode EOR ini dapat dilaksanakan dengan menginjeksikan air, gas, uap panas, *surfactant*, alkali, polimer, atau dsb ke dalam batuan *reservoir* tersebut, tergantung dari properti minyak, properti batuan, dan sejarah sumur yang akan diproses oleh EOR. Injeksi uap merupakan salah satu metode yang sering digunakan untuk meningkatkan cadangan minyak di dalam tanah. Sekitar 70 % dari minyak yang dihasilkan melalui EOR dilaksanakan dengan menggunakan metode injeksi uap [1]. Manfaat utama dari injeksi uap adalah untuk mengurangi viskositas minyak dengan cara memberikan panas dari temperatur *steam injection* [2]. Pada properti batuan dan kondisi sumur yang sama, suhu yang tersimpan dan tertahan pada *reservoir* setelah proses *steam injection* tergantung pada tekanan dan suhu *inlet* yang akan di injeksikan [3].

Pemodelan merupakan salah satu tahapan agar proses EOR ini berhasil. Pembuatan model kondisi operasi *steam injection* bertujuan untuk memprediksi besarnya tekanan dan temperatur yang dibutuhkan untuk proses *steam injection* [4, 5]. Beberapa model *injeksi uap* pada *reservoir* atau *porous medium* telah dilakukan oleh beberapa peneliti dengan menggunakan metode analitis, *numerical*, *finite difference*, *computational fluid dynamic*, dll.

Pemodelan dalam tugas akhir ini menggunakan *Lattice Boltzmann* dan *software* COMSOL yang difokuskan untuk membuat simulasi injeksi uap di dalam batuan. Proses injeksi uap pada proses pemulihan minyak (EOR) meninjau properti batuan dan data PVT injeksi uap. Persamaan *non-dimensional* seperti *reynold number*, *pecelet number*, dll dihitung untuk mengetahui

*pressure*, *volume*, dan *temperature* kondisi operasi proses injeksi uap di sumur dan dikomputasikan ke dalam perangkat lunak.

Hasil dari pemodelan diharapkan dapat mendapatkan kondisi operasi (PVT) uap yang diinjeksikan pada sumur horizontal.

## 1.2. Rumusan Masalah

Proses injeksi uap panas untuk meningkatkan produksi minyak yang masih tersimpan pada *reservoir* memerlukan pemodelan terlebih dahulu sebelum membuat optimasi nilai *pressure* dan *temperature* yang tepat untuk memproduksi minyak berkapasitas besar. Dari masalah tersebut didapat rumusan masalah yakni bagaimana memodelkan dan menvalidasi *pressure*, *volume*, dan *temperature* (PVT) *steam injection* pada proses *enhanced oil recovery*.

## 1.3. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini yaitu:

- Membuat model kondisi operasi injeksi uap di *core berea sandstone* menggunakan metode *lattice Boltzmann* dan perangkat lunak COMSOL dengan berbagai nilai *pressure* dan *temperature inlet* dan membandingkannya
- Membuat validasi model dengan eksperimen pada *core holder* dengan *steam injector* dan *core berea sandstone*.

## 1.4. Scope of Work

Hal hal yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi:

- Memodelkan *pressure* dan *temperature* pada batuan *bera sandstone* dengan *porosity* 0.22 dan *permeability* 1250mD
- Volume diasumsikan mengikuti *pressure* dan *temperature* dengan menggunakan tabel PVT
- Membuat simulasi penurunan P dan T pada *software* COMSOL dan MATLAB
- *Lattice Boltzmann* hanya digunakan untuk temperatur pada MATLAB

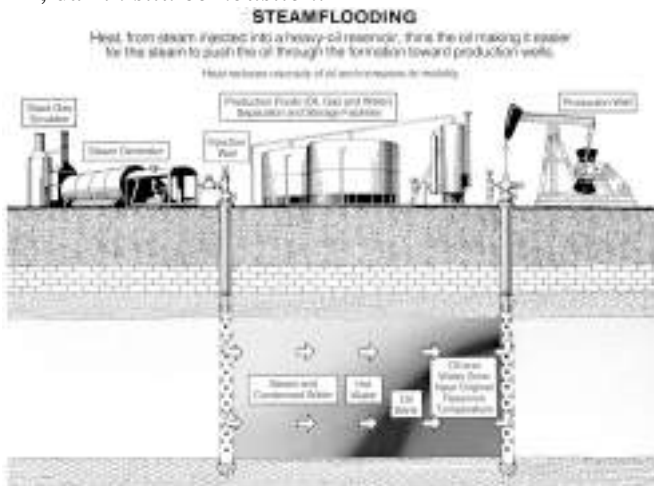
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. *Enhanced Oil Recovery (EOR)*

Proses EOR merupakan teknik yang dikenal untuk memproduksi minyak tambahan dari reservoir minyak bumi dengan cara memasukkan bahan yang dapat menurunkan viskositas minyak di dalam reservoir [1]. Metode ini secara umum dibagi menjadi tiga kategori utama.

- *Chemical Flooding*: Injeksi air bercampur bahan kimia yang ditambahkan ke dalam *reservoir* minyak bumi. Proses kimia meliputi: *surfactant flooding*, *polymer flooding*, dan *alkaline flooding*.
- *Miscible Flooding*: Injeksi ke *reservoir* dari bahan yang terlarut. Bahan tersebut adalah karbon dioksida, hidrokarbon, dan nitrogen.
- *Thermal Recovery*: Injeksi uap ke dalam *reservoir* minyak bumi, atau penyebaran zona panas melalui *reservoir* melalui udara atau oksigen. Proses termal meliputi: *steam flooding* (seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.1), injeksi uap siklik, dan *in situ combustion*.



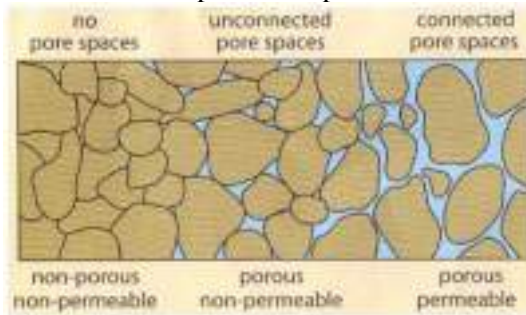
**Gambar 2. 1.** Proses injeksi *steam* pada *reservoir*

## 2.2. *Heavy Oil Recovery dengan Proses Steam Injection*

*Heavy oil* adalah minyak mentah dengan API gravity kurang dari 22,3° dan *viscosity* yang lebih dari 100 cp (Centipoise). Kandungan *heavy oil* sampai dengan kategori bitumen (API gravity < 10°, *viscosity* > 10.000) memiliki jumlah lebih dari 2/3 dari kandungan minyak bumi yang ada di bumi. Karena karakteristiknya, *heavy oil* tidak mudah untuk dieksploitasi sehingga dibutuhkan usaha lebih untuk mendapatkannya yaitu dengan EOR. Salah satu jenis metode EOR adalah menggunakan energi panas. Energi panas tersebut bisa didapat dari injeksi uap dan pembakaran (*in situ combustion*). Metode yang menggunakan injeksi uap antara lain *cyclic steam stimulation*, *steam assisted gravity drainage* dan *steam flooding*. Sedangkan metode yang menggunakan pembakaran adalah *in-situ combustion*.

## 2.3. Aliran Fluida dan Perpindahan Panas pada *Porous Medium*

*Porous medium* adalah bahan yang mengandung *void* / pori-pori, yang dapat berisi cairan (*liquid* atau *gas*). Bagian rangka dari material *porous medium* ini sering disebut "*matrix*" atau "*frame*" yang biasanya padat; Matriks padat diasumsikan *solid* dan matriks di mana terdapat pori-pori diasumsikan sebagai cairan dengan fase tunggal. Baik matriks padat dan jaringan pada media berpori, diasumsikan strukturnya sama seperti spons. Gambaran *porous medium* batuan dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2. 2.** Gambaran *porous medium*

*Porous medium* memiliki dua parameter makroskopik penting yang dipengaruhi oleh struktur pori. Salah satunya adalah permeabilitas, yang mengacu pada ukuran kemampuan bahan (batuan) untuk mengirimkan cairan. Ini sangat ditentukan oleh geometri pori (seberapa besar pori-pori, dan bagaimana jarak pori di dalam batuan itu). Parameter makroskopik lain yang penting dari *porous medium* adalah porositas yang merupakan jumlah ruang kosong. Porositas *porous medium* didefinisikan sebagai:

$$\Phi = \frac{\text{void volume in porous medium sample}}{\text{total volume of porous medium sample}} \quad 2.1.$$

Secara umum struktur *porous medium* dan pemodelan aliran fluida sangat kompleks dan sulit untuk dimodelkan.

## 2.4. Persamaan Darcy dan Permeabilitas

Permeabilitas diperkenalkan oleh Darcy pada tahun 1856 dan di didefinisikan sebagai tingkat kemudahan bagi cairan untuk bergerak melalui ruang berpori. Persamaan umum Darcy adalah dijelaskan sebagai berikut:

$$v = -k_f \nabla h \quad 2.2.$$

Dimana:

$v$  = Velocity (m/s)

$k_f$  = Proportional Factor (m/s)

$\nabla h$  = Hydraulic Gradient (m/m)

Persamaan (2.2) menunjukkan bahwa konduktivitas hidrolik tidak hanya terdiri atas parameter batuan tetapi juga bergantung pada parameter fluida di dalamnya, hal ini dapat dilihat seperti pada Persamaan (2.3) [2].

$$k_f = K \frac{\rho g}{\mu} \quad 2.3.$$

Dimana:

$K$  = Permeabilitas intrinsik tanah ( $m^2$ )

$\rho$  = *Density* ( $kg/m^3$ )

$g$  = *Gravity constant* (9.8)

$\mu$  = *Dynamic viscosity* (Pa.s)

Permeabilitas intrinsik  $K$  [ $m^2$ ] adalah properti dari batuan dan *density*  $\rho$  dan  $\mu$  merupakan properti fluida. Darcy's law diterapkan untuk menghitung aliran fluida yang berada di media berpori. Namun, untuk aliran *multiphase* persamaan (2.3) harus dimodifikasi, mempertimbangkan cairan yang berada pada medium memiliki mobilitas yang lain. Hal ini menyebabkan permeabilitas relatif pada hukum darcy mengalami faktor pengurangan permeabilitas<sup>[2]</sup>.  $k_{r,\alpha}$  bervariasi antara 0 dan 1 di mana kondisi fase tunggal ditentukan oleh  $k_{r,\alpha} = 1$ . Bentuk Hukum Darcy untuk *multiphase* kemudian ditulis,

$$v_{\alpha} = \frac{k_{r,\alpha}}{\mu_{\alpha}} K \cdot (\nabla p_{\alpha} - \rho g) \quad 2.4.$$

Dimana:

$v_{\alpha}$  = *Velocity* pada fase  $\alpha$  ( $\alpha=1$  untuk fase tunggal)

$k_{r,\alpha}$  = Konstanta fase

$\nabla p_{\alpha}$  = Perbedaan *pressure*

Media berpori yang dimaksud Persamaan 2.4 salah satu contohnya adalah batuan yang menyimpan minyak berat, yang masih bisa di *recovery* untuk di produksi. Tetapi dikarenakan tidak ada batuan yang memiliki nilai *permeability* sebesar  $1 \text{ cm}^2$ , maka dibuatlah suatu satuan baru yang dinamakan *darcy* dengan nilai  $1 \text{ darcy} = 9,869 \times 10^{-9} \text{ cm}$ . Salah satu alat untuk melihat perpindahan aliran atau penurunan *pressure* pada batuan adalah *core holder* yang skematiknyanya dapat dilihat pada Gambar 2.3.



## 2.5. Dimensionless Number

*Dimensionless Number* adalah sebuah angka yang menunjukkan nilai sebuah besaran tanpa dimensi. *Dimensionless number* digunakan dalam tugas akhir ini untuk mensimulasikan fluida yang terjadi di dunia nyata ke dalam bentuk komputasi di dalam komputer. Beberapa *dimensionless number* yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah :

### 2.5.1. Reynold Number

*Reynold number* merupakan bilangan tak berdimensi yang merepresentasikan rasio antara gaya inersia dan gaya *viscous*.

$$Re = \frac{\text{Inertia Forces}}{\text{Viscous Forces}} \quad 2.5.$$

*Reynold number* sering digunakan untuk mempelajari analisis dimensi dari masalah dinamika fluida yang ada di dunia nyata. Selain itu, *reynold number* juga biasa digunakan untuk menentukan perbedaan aliran yang ada:

- *Laminar flow*, terjadi ketika *Reynolds number* dibawah 2000
- *Transition Flow*, terjadi ketika *Reynolds number* diantara 2000 dan 4000
- *Turbulent Flow*, terjadi ketika *Reynold number* diatas 4000

*Reynold number* digunakan sebagai angka berbagai situasi dimana fluida yang bergerak dengan berbagai gaya di permukaan. Definisi ini secara umum termasuk kepada pengaruh dari *density* dan *viscosity*, ditambah *velocity* dan karakteristik panjang atau karakteristik dimensi [3].

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu} \quad 2.6.$$

Dimana:

- $Re$  = *Reynold number*  
 $\rho$  = *density* ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $u$  = *velocity* ( $\text{m/s}$ )  
 $L$  = *characteristic length* ( $\text{m}$ )  
 $\mu$  = *dynamic viscosity* ( $\text{Kg}/(\text{m.s})$ )  
 $\nu$  = *kinematic viscosity* ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

### 2.5.2. Rayleigh Number

*Rayleigh number* adalah *dimensionless number* yang digunakan didalam mekanika fluida untuk menjelaskan factor *buoyancy driven flow* atau *natural convection*. Jika konduksi yang terjadi, itu berarti nilai *Rayleigh number* berada di bawah nilai *critical* untuk fluida ( $Ra_c = 657.511$ ). Jika *Rayleigh number* berada diatas nilai *critical* maka perpindahan panas terjadi secara konveksi.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta}{\nu \cdot \alpha} \Delta T \cdot L^3 \quad 2.7.$$

Dimana:

- $Ra$  = *Rayleigh number*  
 $g$  = Konstanta gravitasi ( $\text{N/kg}$ )  
 $\beta$  = Koefisien ekspansi termal ( $1/\text{K}$ )  
 $\Delta T$  = Perbedaan *temperature* antara permukaan dan *temperature* sekitar  
 $L$  = *Characteristic length* ( $\text{m}$ )  
 $\nu$  = *Kinematic viscosity* ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $\alpha$  = *Thermal diffusivity* ( $\alpha = \lambda / (\rho \cdot c_p)$ ) dimana  $\lambda$  adalah koefisien konduksi panas ( $\text{W}/(\text{m.K})$ ),  $\rho$  adalah *density* ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c_p$  adalah *specific heat* ( $\text{J/kg.K}$ )

### 2.5.3. Prandtl Number

*Prandtl number* adalah *dimensionless number* yang menunjukkan rasio *kinematic viscosity* dan *thermal diffusivity* [4].

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad 2.8.$$

Dimana:

- Pr = *Prandtl number*  
 $\nu$  = *kinematic viscosity* (m<sup>2</sup>/s)  
 $\alpha$  = *thermal diffusivity* (m<sup>2</sup>/s)  
 $\mu$  = *dynamic viscosity* (kg/m.s)  
 $c_p$  = *specific heat capacity* (J/kg.K)  
 $k$  = *thermal conductivity* (W/m.K)

Persamaan 2.8 digunakan untuk menghitung perpindahan panas beberapa properti fluida dengan *prandtl number* yang bisa dikaitkan kepada ketebalan termal dan *velocity boundary layer*. Jika  $Pr = 1$ , maka *boundary layer coincide*;  $Pr < 1$  berarti *thermal diffusivity* mendominasi; dan jika  $Pr > 1$  maka *momentum diffusivity* mendominasi. Tabel *prandtl number* dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2. 1. Prandtl Number**

<i>Material</i>	<i>Nilai Pr</i>
Gas	0.7-1.0
Water	1-10
Liquid Metals	0.001-0.03
Minyak	50-2000
Udara pada 20°C	0.71

#### 2.5.4. Peclet Number

*Peclet number* adalah *dimensionless number* yang menggambarkan rasio energi termal yang di konveksikan dengan energi termal yg dikonduksikan ke dalam fluida. Hal ini bergantung pada kapasitas panas, *density*, *velocity*, *characteristic length*, dan koefisien perpindahan panas. *Peclet number* menggambarkan hasil perkalian dari *reynold number* dan *prandtl number*.

$$Pe = \frac{\text{advective transport rate}}{\text{diffusive transport rate}} = Re \cdot Pr \quad 2.9.$$

#### 2.5.5. Nusselt Number

*Nusselt number* adalah rasio perpindahan panas secara konveksi dengan perpindahan panas secara konduksi.

$$Nu = \frac{\text{convective heat transfer}}{\text{conductive heat transfer}} = \frac{hL}{k_f} \quad 2.10.$$

Dimana:

$L$  = Characteristic length

$k_f$  = Konduktivitas termal dari fluida

$h$  = Koefisien perpindahan panas secara konveksi

*Nusselt number* yang mendekati 1 di asosiasikan sebagai aliran laminar dan nilai antara 100-1000 secara umum di asosiasikan sebagai aliran turbulen [5]. Tabel penjelasan besar *nusselt number* dapat dilihat Tabel 2.2.

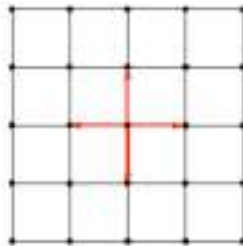
**Tabel 2. 2.** *Nusselt Number*

	<i>Correlation</i>	<i>Notes</i>
<i>Laminar Flow</i>	$Nu = 3.66$	Untuk temperatur <i>boundary</i> yang konstan
	$Nu = 4.36$	Untuk <i>heat flux</i> yang konstan
<i>Turbulent Flow</i>	$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n$	n = 0.4 untuk pemanasan n = 0.33 untuk pendinginan berlaku untuk

		0.6 $\leq Pr \leq 160$
	$Nu = \frac{\frac{f}{2}(Re-1000)Pr}{1+12.7\sqrt{\frac{f}{8}}(Pr^{1/4}-1)}$	Dimana $f = \frac{1}{(1.819916\frac{Re}{Pr^{0.9}})^2}$ adalah factor friksi <i>Darcy</i>

## 2.6. Lattice Boltzmann

*Lattice Boltzmann* merupakan metode yang cukup baik untuk mengkomputasikan sebuah fluida yang dinamis. Metode ini merupakan pengembangan metode dari *Lattice Gas Automata* (LGA) dimana LGA dikembangkan dari sel automata atau sistem *grid* pada model komputer yang di definisikan dalam bentuk matematis. Metode ini merupakan model untuk mengamati pergerakan partikel secara *single* menggunakan sifat-sifat fluida. Gambaran mengenai *lattice* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2. 3.** *Square Lattice - model node rectangle*

Persamaan yang digunakan untuk membuat *lattice boltzmann* model pada *steam injection* berdasarkan persamaan kinetik [6] secara mendasar adalah sebagai berikut.

$$n_a(x + e_a \Delta t, t) = n_a(x, t) + \Delta_a \quad 2.11.$$

Dimana:

$n_a$  = Nilai *boolean* dari arah  $a$

$e_a$  = Velocity

$\Delta_a$  = Fungsi *collision*, yang merupakan faktor dependen tergantung dari jenis LB model yang akan digunakan

Massa jenis dihitung berdasarkan jumlah dari banyaknya partikel pada setiap *node* seperti persamaan berikut:

$$\rho(x, t) = \sum_a n_a(x, t) \quad 2.12.$$

Persamaan 2.12 diubah agar dapat menjadi momentum *density* faktor *velocity* dan *macroscopic velocity* ditambahkan:

$$\rho(x, t)u(x, t) = \sum_a e_a n_a(x, t) \quad 2.13.$$

Dimana  $u(x, t)$  adalah *macroscopic velocity* yang berarti *velocity* dari keseluruhan partikel.

$$f_a(x + e_a \Delta t, t + \Delta t) = f_a(x, t) + \Delta_a \quad 2.14.$$

Model ini merupakan bentuk fungsi distribusi partikel secara keseluruhan, yang nantinya akan digunakan untuk persamaan distribusi fungsi pada simulasi *steam injection* dimana *boolean* sudah diganti dengan partikel *single distribution function*  $f_a$  [7].

## 2.7. Distribution Function

*Distribution function* ( $f_a$ ) adalah fungsi dari 7 variabel  $f(x, y, z, t; e_x, e_y, e_z)$  untuk 3 dimensi, dimana  $x, y, z$  menggambarkan posisi *cartesian*,  $t$  menggambarkan waktu, dan  $e_x, e_y, e_z$  menggambarkan *velocity* pada *axis*. *Distribution function velocity*  $f(e_x)$  di definisikan sebagai faksi partikel di lokasi tertentu pada gas atau *liquid* dengan *velocity* antara  $e_x$  dan  $e_x + de_x$  pada arah  $x$  dan begitu untuk  $y$  dan  $z$ . Fungsi distribusi untuk *velocity* yang telah diturunkan dibandingkan dengan persamaan yang ada, didapat persamaan fungsi distribusi untuk *velocity* [6] sebagai berikut :

$$f(\epsilon) = \left[ \frac{m}{2\pi kT} \right]^3 \exp \left[ -\frac{m\epsilon^2}{2kT} \right] \quad 2.15.$$

Dimana:

$f(\epsilon)$  = Fungsi distribusi *velocity*

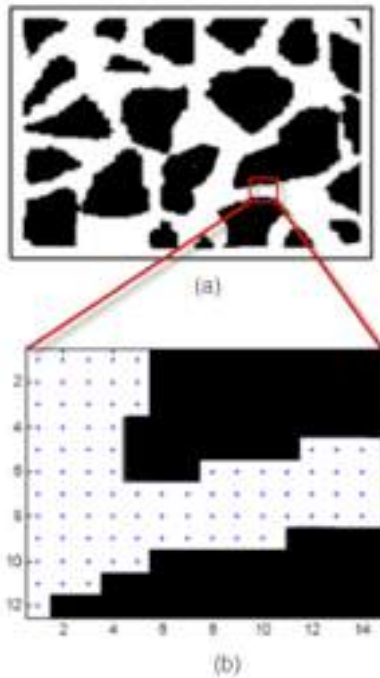
$m$  = Massa partikel (kg)

$k$  = Konstanta *boltzmann*

$T$  = *temperature* (K)

## 2.8. Node pada Metode *Lattice Boltzmann*

Metode *lattice boltzmann* untuk simulasi aliran fluida memberikan gambaran bentuk fisik menjadi *node lattice* yang di perlihatkan secara mikroskopik [8]. *Lattice* adalah sekumpulan data tersusun yang memiliki nilai untuk satu variabel yang sama [1]. Gambar 2.5 menggambarkan *porous medium* berdasarkan referensi jurnal dengan *node lattice*.



**Gambar 2. 4.** (a) gambar struktur di dalam *porous medium*, (b) *node Lattice* berupa titik-titik di tengah area berwarna putih

*Lattice node* ini di representasikan sebagai partikel fluida yang terdiri atas fungsi distribusi  $f_a(x,t)$ .

### 2.9. Persamaan *Heat Transfer* dengan *Lattice Boltzmann*

Persamaan 2.16 merupakan persamaan yang telah dimodelkan oleh Guo *et al* pada tahun 2002, yang merupakan persebaran *thermal* untuk tiap *node* pada partikel dengan metode *lattice boltzmann*.

$$g_u(x + e_a \delta_t, t + \delta_t - g_u(x, t)) = -\frac{1}{\tau_c} [g_u(x, t) - g_u^e] \quad 2.16.$$



Dimana :

$\mu_a(x, t)$	= <i>Thermal distribution function</i>
$e_a$	= <i>Velocity</i> pada posisi $x$ dan waktu $t$
$\delta_t$	= <i>Kenaikan waktu</i>
$\tau_v$	= <i>Dimensionless relaxation time</i>
$g_a^{(eq)}$	= <i>Fungsi distribusi equilibrium</i>

Kalkulasi *lattice boltzmann* terdiri atas tahap *collision*, *streaming*, dan dibatasi oleh *boundary* [9]. Persamaan keduanya dapat dilihat pada Persamaan 2.17 dan Persamaan 2.18:

Persamaan *collision step*:

$$\mu_a^{out}(x, t) = \mu_a^{in}(x, t) + \Omega_a(\mu_a^{in}(x, t)) \quad 2.17.$$

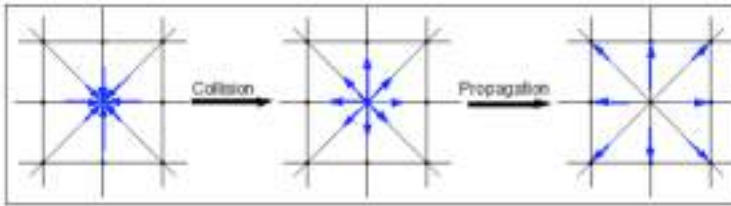
Persamaan *streaming* atau *propagation step*:

$$\mu_a^{in}(x + e_a \cdot \delta_t, t + \delta_t) = \mu_a^{out}(x, t) \quad 2.18.$$

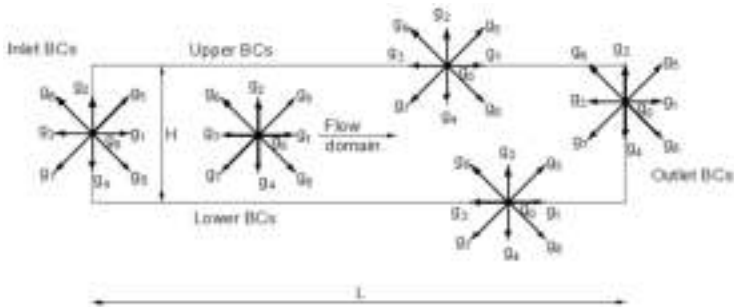
Dimana :

$g_a^{out}$	= Nilai distribusi setelah <i>collision</i>
$g_a^{in}$	= Nilai setelah <i>collision</i> dan <i>propagation</i>
$\Omega_a$	= Fungsi <i>collision</i>

Kedua Persamaan 2.17 dan Persamaan 2.18 yang akan mencerminkan simulasi nantinya di dalam MATLAB. Gambaran *lattice boltzmann* di dalam komputasi dapat dilihat pada Gambar 2.6.



(a)



(b)

**Gambar 2. 5.** (a) Proses metode *lattice boltzmann* yang berjalan setelah iterasi (b) Skema *lattice boltzmann* pada sebuah *medium*

Fungsi *collision* ini di temukan oleh bhatnagar et al pada tahun 1954, persamaan ini diturunkan berdasarkan persamaan *relaxation*, dikarenakan didalam proses *collision* terdapat jeda menuju fungsi *equilibrium*, fungsi *relaxation* ini di jabarkan sebagai berikut:

$$\Omega(f)\Delta t = -\frac{f - f^{eq}}{\lambda} \quad 2.19.$$

Dimana:

$\Omega(f)$  = Operasi *Collision*

$\lambda$  = *Relaxation time* fungsi dari *viscosity*

$f$  = fungsi distribusi

$f^{eq}$  = fungsi distribusi *equilibrium*

Sebelum masuk penjelasan D2Q9, adapun *weight factor* yang digunakan sebagai acuan untuk pemberatan *vector* arah dari tiap node [10]. Hal ini yang dapat dilihat pada uraian dan Tabel 2.3:

- $w_0$ ,  $a = 0$ , ini adalah *rest vector*
- $w_s$ ,  $a = 1, 2, 3, 4$ , ini adalah *short vector*
- $w_l$ ,  $a = 5, 6, 7, 8$ , ini adalah *long vector*

Berdasarkan perhitungan referensi yang telah dikemukakan, adapun beberapa kondisi yang terkait dengan penentuan nilai *weight factor* ini, dirumuskan sebagai berikut:

$$w_0 + 4w_s + 4w_l = 1 \quad 2.20.$$

$$2w_s + 4w_l = c_s^2 \quad 2.21.$$

$$2w_s + 4w_l = 3c_s^4 \quad 2.22.$$

$$4w_l = c_s^6 \quad 2.23.$$

Dimana  $c_s$  adalah kecepatan suara (340 m/s). Gambaran *weight factor* untuk tiap *node* ditampilkan dalam tabel sebagai berikut:

**Tabel 2. 3.** Detil data D2Q9 pada *lattice boltzmann*

D2Q9	
$e_a$	$w_a$
(0,0)	$w_0=4/9$
( $\pm 1,0$ )	$w_s=1/9$
( $\pm 1,\pm 1$ )	$w_l=1/36$

*Velocity vector* digambarkan dengan sudut pembagian berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Frisch et al, yang disederhanakan menjadi seperti berikut [11]:

$$e_a = (\cos \pi a/3, \sin \pi a/3) \quad 2.24.$$

Dimana  $a$  adalah jumlah arah pada *velocity vector* ( $a=1,2,3,...,8$ ).

Setelah diketahui *weight factor* tersebut, maka fungsi distribusi *equilibrium function* berubah menjadi :

$$g_a^{(eq)} = w_a \rho \left( 1 + \frac{3e_a \cdot u}{c^2} + \frac{9(e_a \cdot u)^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2} \right) \quad 2.25.$$

Dimana  $c$  adalah  $c_s \sqrt{3}$ . Untuk persamaan pada penelitian ini digunakan dengan 9 node dan 2 dimensi, membuat distribusi *equilibrium* fungsi *temperature* menjadi:

$$\begin{aligned}
 g_0^{(eq)} &= -\frac{2\rho e u^2}{3c^2} \\
 g_{1-4}^{(eq)} &= -\frac{\rho e}{9} \left[ \frac{3}{2} + \frac{3e_a \cdot u}{c^2} + \frac{9(e_a \cdot u)^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2} \right] ; (a=1,2, \\
 &\quad 3,4) \\
 g_{5-8}^{(eq)} &= -\frac{\rho e}{36} \left[ 3 + \frac{6e_a \cdot u}{c^2} + \frac{9(e_a \cdot u)^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2} \right] ; (a=5,6,7 \\
 &\quad ,8)
 \end{aligned} \quad 2.26.$$

Dimana  $e = 3RT/2$ , dengan  $R$  adalah konstanta gas ( $R=8.314$  [J/mol]-K), maka *temperature* dan *density* secara *macroscopic* dihitung sebagai berikut:

$$\rho\left(\frac{2RT}{2}\right) = \sum_{\alpha} \mu_{\alpha} \quad 2.27.$$

Selain tahapan *collision* dan *propagation* adapun *boundary* yang dijadikan sebagai acuan untuk pengaruh dari lingkungan. *Boundary* ini terdiri atas *inlet*, *bottom*, *top*, dan *outlet*, dan terdiri atas *temperature boundary* dan *velocity boundary*.

*Inlet boundary*

$$\begin{aligned} \mu_1 &= T_{inlet}(w(1) + w(3))) - \mu_3 \\ \mu_1 &= \left(\frac{2}{9}\right)T_{inlet} - \mu_3 \end{aligned} \quad 2.28.$$

$$\begin{aligned} \mu_5 &= T_{inlet}(w(5) + w(7))) - \mu_7 \\ \mu_5 &= \left(\frac{1}{18}\right)T_{inlet} - \mu_7 \end{aligned} \quad 2.29.$$

$$\begin{aligned} \mu_9 &= T_{inlet}(w(9) + w(6))) - \mu_6 \\ \mu_9 &= \left(\frac{1}{18}\right)T_{inlet} - \mu_6 \end{aligned} \quad 2.30.$$

*Bottom wall boundary*

$$\begin{aligned} \mu_2 &= T_{wall}(w(2) + w(4))) - \mu_4 \\ \mu_2 &= \left(\frac{2}{9}\right)T_{wall} - \mu_4 \end{aligned} \quad 2.31.$$

$$\begin{aligned} \mu_5 &= T_{wall}(w(5) + w(7))) - \mu_7 \\ \mu_5 &= \left(\frac{1}{18}\right)T_{wall} - \mu_7 \end{aligned} \quad 2.32.$$

$$\begin{aligned}
 \mu_6 &= T_{wall}(w(6) + w(8)) - \mu_8 \\
 \mu_6 &= \left(\frac{1}{18}\right)T_{wall} - \mu_8
 \end{aligned}
 \tag{2.33}$$

*Top wall boundary*

$$\begin{aligned}
 \mu_4 &= T_{wall}(w(2) + w(4)) - \mu_2 \\
 \mu_4 &= \left(\frac{2}{9}\right)T_{wall} - \mu_2
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

$$\begin{aligned}
 \mu_7 &= T_{wall}(w(5) + w(7)) - \mu_5 \\
 \mu_7 &= \left(\frac{1}{18}\right)T_{wall} - \mu_5
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

$$\begin{aligned}
 \mu_9 &= T_{wall}(w(6) + w(8)) - \mu_6 \\
 \mu_9 &= \left(\frac{1}{18}\right)T_{wall} - \mu_7
 \end{aligned}
 \tag{2.36}$$

*Outlet boundary*

$$\mu_{3,x} = 2\mu_{3,x-1} - \mu_{3,x-2} \tag{2.37}$$

$$\mu_{6,x} = 2\mu_{6,x-1} - \mu_{6,x-2} \tag{2.38}$$

$$\mu_{7,x} = 2\mu_{7,x-1} - \mu_{7,x-2} \tag{2.39}$$

Dari persamaan *boundary* tersebut *temperature* dapat didapatkan dengan memasukkan semua fungsi *thermal distribution* g kedalam Persamaan 2.41 dan Persamaan 2.42.

$$T = \sum_{\alpha=0}^8 g_{\alpha} \quad 2.40.$$

$$\sum_{\alpha=0}^8 g_{\alpha} = g_0 + g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5 + g_6 + g_7 + g_8 \quad 2.41.$$

Dimana  $g$  adalah distribusi fungsi *thermal lattice boltzmann*, dari ke 4 *boundary* tersebut *temperature* tertentu bisa didapatkan untuk 1 partikel (9 *node*) pada *lattice boltzmann* dengan jarak  $x$  dan waktu  $t$ , dihitung sebagai berikut:

$$T_{(x,t)} = \sum_{\alpha=0}^8 g_{\alpha}(x,t) \quad 2.42.$$

## 2.10. Persamaan *Pressure* Dari Hukum Darcy

Berdasarkan penelitian Darcy pada tahun 1856, persamaan tekanan :

$$\begin{aligned} q &\propto \Delta P \\ q &\propto A \\ q &\propto 1/L \end{aligned} \quad 2.43.$$

Dimana:

$q$  = Laju aliran fluida (volumetrik) ( $m^3/detik$ )

$\Delta P$  = Beda tekanan dari titik awal dan titik akhir (psi)

$A$  = Luas area yang dilalui oleh fluida ( $m^2$ )

$L$  = Panjang medium yang dilalui (m)

Dari hubungan di atas didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$q = c A \Delta P / L \quad 2.44.$$

Konstanta  $c$  didapat dari *inverse* proporsional viskositas fluida yang digunakan. Oleh karena itu diganti dengan  $k/\mu$  sehingga persamaannya menjadi:

$$q = k \frac{A \Delta P}{\mu L} \quad 2.45.$$

$$\Delta P = \mu \frac{L}{k A} q \quad 2.46.$$

Konstanta ( $k$ ) merupakan nilai permeabilitas dari medium dengan dimensi  $\text{cm}^2$ . Karena tidak ada batuan yang memiliki nilai *permeability* sebesar  $1 \text{ cm}^2$ , maka dibuat suatu satuan baru yang dinamakan *darcy* dimana  $1 \text{ darcy} = 9,869 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$ .

### 2.11. Perangkat Lunak COMSOL *Multiphysics*

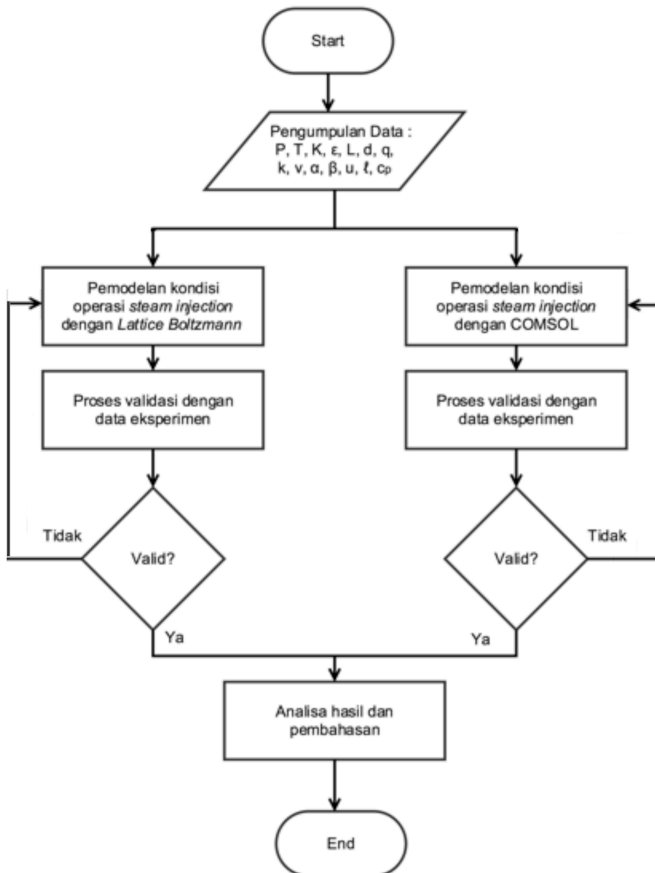
COMSOL *multiphysics* merupakan perangkat lunak yang dinamakan dari perusahaan penciptanya itu sendiri COMSOL. Perangkat ini merupakan *tools* untuk mensimulasikan *temperature, pressure, velocity, reaction*, dll pada media yang bermacam-macam, mulai dari media *solid, fluid, porous medium*, dll. Perangkat lunak ini digunakan pada tugas akhir ini untuk melihat lebih jauh *pressure drop* dan *temperature* agar ada komparasi antar model yang nantinya sama-sama akan divalidasi dengan hasil eksperimen.



### BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

Diagram alir penelitian tugas akhir ini digambarkan pada Gambar 3.1, penjelasan masing masing langkah dijelaskan pada subbab ini.



**Gambar 3. 1.** Diagram alir penelitian

### 3.1. Pengumpulan Data

Persamaan yang digunakan untuk membuat *lattice boltzmann* model pada *steam injection* memerlukan beberapa besaran data yaitu *Pressure* (P) dan *Temperature* (T) pada *inlet steam injection* seperti yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 :

**Tabel 3. 1.** *Inlet Pressure dan Temperature Steam Injection*

No. Eksperimen	Temperature (°C)	Pressure (psi)
1	300	1000
2	300	1250
3	300	1500
4	250	1000
5	250	1250
6	250	1500
7	200	1000
8	200	1250
9	200	1500

Selain itu, data *permeability* (K) batuan sebesar 1250 mD, *porosity* ( $\epsilon$ ) sebesar 22%, panjang (L) batuan sebesar 12 cm, diameter (d) batuan sebesar 4 cm, *convective heat transfer coefficient* (h) sebesar 0.01 W/m<sup>3</sup>K, *mean free path* ( $\lambda$ ) sebesar 2.38x10<sup>-8</sup> m, *thermal conductivity* (k) sebesar 2.57x10<sup>-2</sup> W/m-K, *thermal diffusivity* ( $\alpha$ ) sebesar 2.16x10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s, *thermal expansion coefficient* ( $\beta$ ) sebesar 3.18x10<sup>-3</sup> didapatkan dari spesifikasi *properties* batuan yang akan dicoba dan jurnal acuan yang dijadikan referensi, data lainnya yaitu *steam properties* yang terdiri dari *steam kinematic viscosity* ( $\nu$ ) sebesar 1.57x10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s, *steam velocity* (u) sebesar 0.01 m/s, *steam specific heat capacity* (cp) sebesar 920 J/kg.K dan *mean free path* sebesar 2.38x10<sup>-8</sup> dari tabel *properties steam* dan referensi jurnal.

### 3.2. Pemodelan Kondisi Operasi *Steam Injection* dengan *Lattice Boltzmann*

Setiap partikel uap yang ada pada proses *steam injection* di modelkan dengan node yang di dalamnya terdapat fungsi distribusi untuk mengetahui gerak partikel berdasarkan *velocity* dan perpindahan panas dari satu partikel ke partikel lain. Arah bergerak dari *lattice node* didapatkan menggunakan fungsi distribusi *velocity* yang didalamnya terdapat *density* dari partikel tersebut. Sebelum membuat distribusi fungsi pada *node*, *dimensionless number* inisialisasi ditentukan terlebih dahulu, tergambaran pada Tabel 3.2 merupakan daftar nilai *dimensionless number* yang di jadikan acuan untuk perhitungan [17].

**Tabel 3. 2.** Daftar *dimensionless number* yang telah dikalkulasi

<b><i>Dimensionless Number</i></b>	<b>Nilai</b>
<i>Nusselt Number</i>	0.094
<i>Knudsen Number</i>	$1.9 \times 10^{-7}$
<i>Reynold Number</i>	76.430
<i>Prandtl Number</i>	0.720
<i>Rayleigh Number</i>	$3.5 \times 10^7$

Perhitungan *temperature* dengan menggunakan Persamaan 2.40 dilakukan di dalam MATLAB untuk mendapatkan *T outlet* pada *x* atau jarak dan *t* atau waktu tertentu. *Temperature* awal atau *temperature inlet* di inputkan pada Persamaan 2.28 sampai Persamaan 2.30. Setelah input dimasukkan, proses perhitungan dilakukan berdasarkan tahapan *collision* dan *propagation* menggunakan Persamaan 2.17 dan Persamaan 2.18. Dari perhitungan *collision* dan *propagation* tersebut fungsi distribusi *g* pada *node* dijumlahkan dengan menggunakan Persamaan 2.40 dan didapatkanlah *temperature*

pada posisi dan waktu tertentu. Hasil dari metode *lattice boltzmann* untuk *temperature* ini dapat dilihat pada halaman 29.

Perhitungan *pressure* di MATLAB, menggunakan Persamaan 2.43, dimana nantinya kita mendapatkan *delta pressure* berdasarkan panjang, kecepatan, viskositas, dan *permeability* batuan tersebut. Dari Persamaan 2.43, *delta pressure* ini di kurangkan dengan *pressure inlet* yang nantinya akan kita dapatkan berapa besar *pressure outlet* pada panjang tertentu. Perubahan *pressure* ini di anggap berubah-ubah setiap panjangnya dikarenakan perbedaan viskositas untuk setiap fluida yang telah masuk ke dalam batuan berpori tersebut.

### 3.3. Pemodelan Kondisi Operasi *Steam Injection* dengan COMSOL *Multiphysics*

COMSOL *multiphysics* digunakan untuk mensimulasikan *steam injection* berdasarkan data *core* Berea sandstone dari Universiti Teknologi PETRONAS, data yang digunakan pada COMSOL dapat dilihat pada Tabel 3.3:

**Tabel 3. 3.** Tabel properti *steam* dan *sandstone* pada COMSOL

No	T Inlet (°C)	P Inlet (psi)	Dynamic Viscosity (Cp)	Thermal Conductivity (W/m.K)	Density (kg/m3)	Heat Capacity (J/kg.K)
1	300	1000	0.021	0.025	2500	920
2	300	1250	0.021	0.025	2500	920
3	300	1500	0.087	0.025	2500	920
4	250	1000	0.018	0.025	2500	920
5	250	1250	0.018	0.025	2500	920
6	250	1500	0.103	0.025	2500	920
7	200	1000	0.016	0.025	2500	920
8	200	1250	0.016	0.025	2500	920
9	200	1500	0.131	0.025	2500	920

Pemodelan pada COMSOL dilakukan pertama dengan memasukkan *properties material* yang akan digunakan. Pada perangkat lunak dan simulasi kali ini, yang digunakan adalah batuan *sandstone* dan fluida *steam* dengan *properties* seperti Tabel 3.2. Setelah *properties* didefinisikan pada *material* di COMSOL, persamaan dimasukkan yaitu persamaan *Darcy* untuk penentuan *pressure* dan persamaan *heat transfer* untuk perpindahan panas, semua persamaan menggunakan persamaan untuk *porous medium*. Setelah persamaan dimasukkan, terdapat beberapa sistem yang harus dimasukkan pertama untuk *temperature* yaitu *temperature inlet*, *outflow*, *temperature boundary*, dan *temperature initial*. Untuk *pressure* sistem yang dimasukkan adalah *pressure inlet*, *outflow*, *initial pressure*, dan *velocity inlet* dan *outlet*. Setelah semua sistem didefinisikan, semua *inlet temperature* dan *pressure* dimasukkan ke dalam COMSOL pada sistem *inlet*. Data yang telah dimasukkan ke dalam sistem kemudian di proses dengan menggunakan tombol *compute* dimana nantinya iterasi akan berjalan untuk tiap jarak dan waktu tertentu. Setelah *compute* selesai, maka hasil dari COMSOL untuk penurunan *pressure* dan *temperature* akan terlihat dan dapat kita dapatkan *pressure* dan *temperature* pada tiap titiknya.

### 3.4. Proses Validasi dengan Data Eksperimen

Untuk mengetahui keakuratan dan kebenaran model yang digunakan, validasi dilakukan dengan eksperimen menggunakan *core holder* dan *steam injection equipment* skala laboratorium di Universiti Teknologi PETRONAS. Data yang digunakan sama dengan model dan simulasi oleh *lattice boltzmann* dan COMSOL, susunan data input dapat dilihat pada Tabel 3.1.

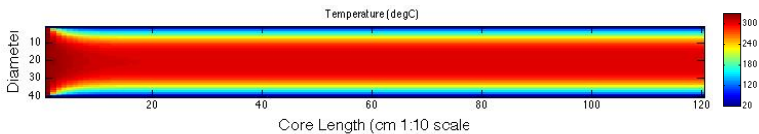
Halaman ini memang dikosongkan

## BAB IV

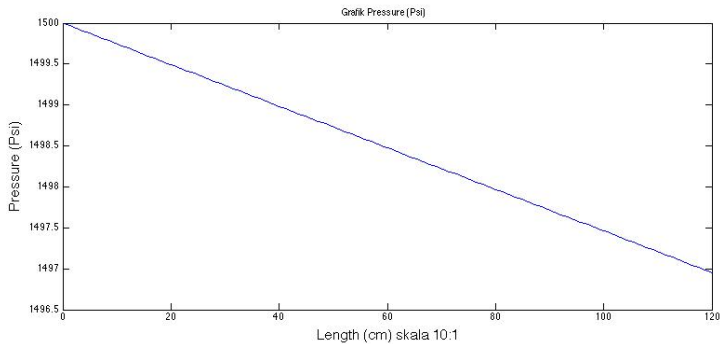
### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Hasil Simulasi MATLAB

Input disesuaikan berdasarkan tabel *inlet pressure* dan *temperature* yang ada pada Tabel 3.1. Model dilakukan 9 kali dengan input nilai *inlet* yang berbeda-beda. Gambar 4.1 hingga Gambar 4.9 adalah hasil dari model *lattice boltzmann* yang di program di dalam MATLAB.



(a)

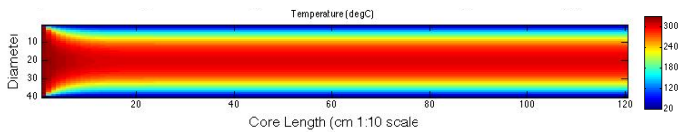


(b)

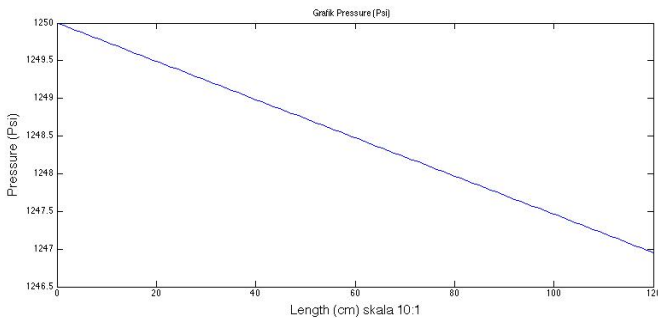
**Gambar 4. 1.** (a) Pada  $T_{inlet}$   $300^{\circ}\text{C}$  grafik *temperature* menunjukkan besar  $T_{outlet}$   $279.70^{\circ}\text{C}$  pada titik 12 cm. (b) Pada  $P_{inlet}$  1500 psi grafik *pressure* menunjukkan besar  $P_{outlet}$  1497.12 psi

Gambar 4.1 (a) merepresentasikan perpindahan panas dengan *gradient* warna (merah tua  $573\text{K}$  atau  $300^{\circ}\text{C}$  dan besar

suhu menurun berdasarkan *gradient* warnanya) dan Gambar 4.1 (b) adalah penurunan *pressure* (paling besar 1500 psi dan menurun hingga 1497.12 psi) kedua gambar ini dibandingkan dengan jarak yaitu 12 cm kemudian perubahan nilai *input temperature* diubah dari 300°C, 250°C, 200°C. Sedangkan nilai *input pressure* diubah dari 1500 psi, 1250 psi, hingga 1000 psi. Perubahan nilai *inlet pressure* dan *temperature* digambarkan pada lanjutan di Gambar 4.2 hingga Gambar 4.9.



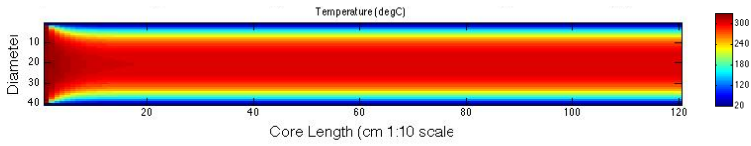
(a)



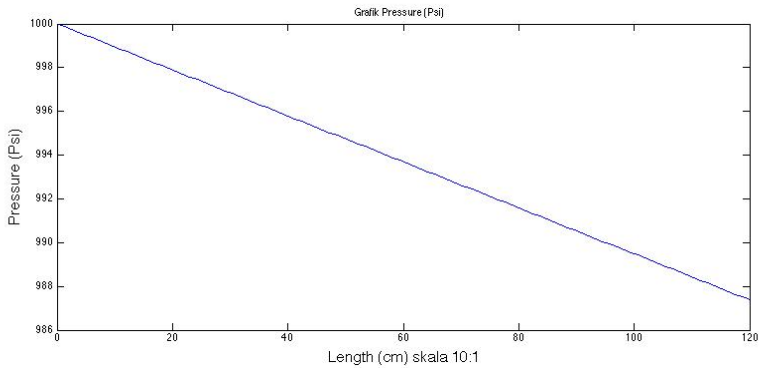
(b)

**Gambar 4. 2.** (a) Pada  $T_{inlet}$  300°C grafik *temperature* menunjukkan besar  $T_{outlet}$  276.15°C pada titik 12 cm. (b) Pada  $P_{inlet}$  1250 psi grafik *pressure* menunjukkan besar  $P_{outlet}$  1247.04 psi



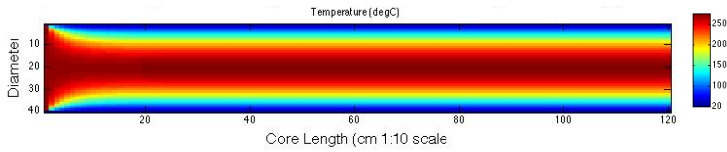


(a)

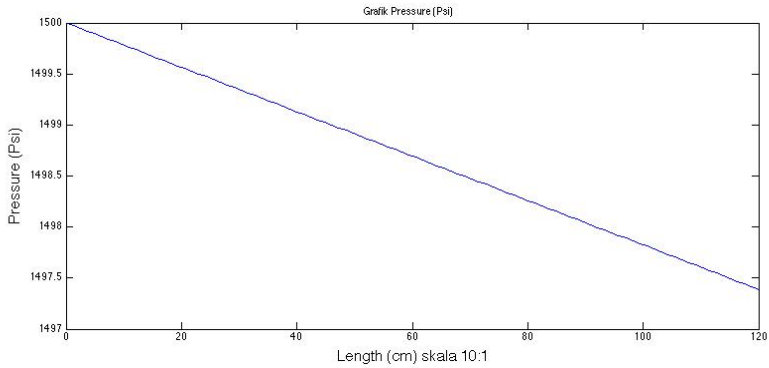


(b)

**Gambar 4.3.** (a) Pada  $T_{inlet}$   $300^{\circ}\text{C}$  grafik *temperature* menunjukkan besar  $T_{outlet}$   $275.50^{\circ}\text{C}$  pada titik 12 cm. (b) Pada  $P_{inlet}$  1000 psi grafik *pressure* menunjukkan besar  $P_{outlet}$  987.38 psi

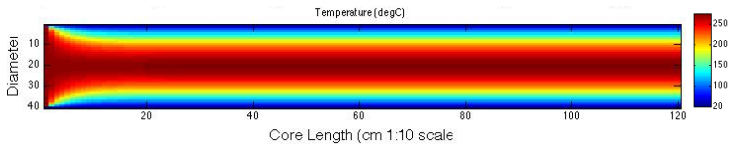


(a)

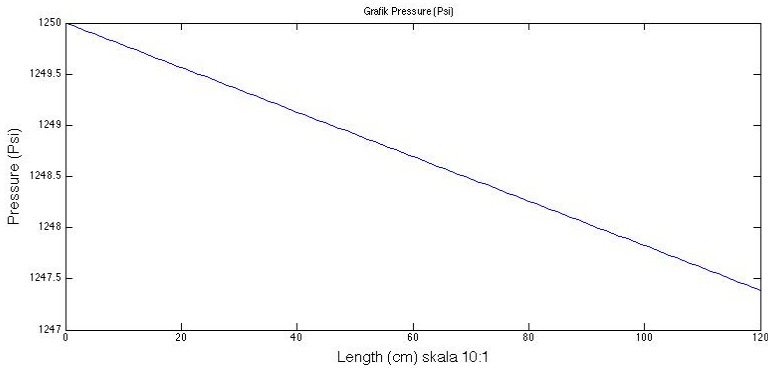


(b)

**Gambar 4. 4.** (a) Pada  $T_{inlet}$   $250^{\circ}\text{C}$  grafik *temperature* menunjukkan besar  $T_{outlet}$   $248.47^{\circ}\text{C}$  pada titik 12 cm. (b) Pada  $P_{inlet}$  1500 psi grafik *pressure* menunjukkan besar  $P_{outlet}$  1497.40 psi

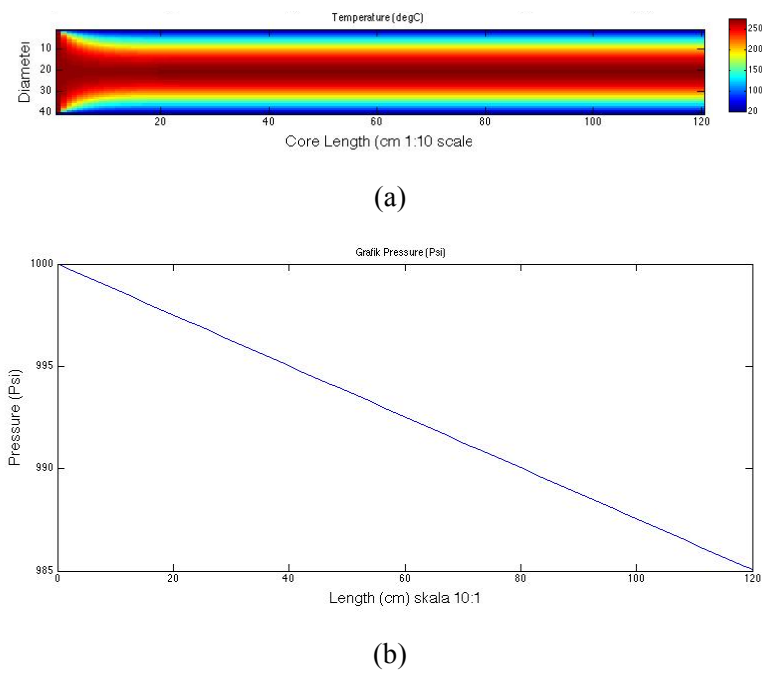


(a)

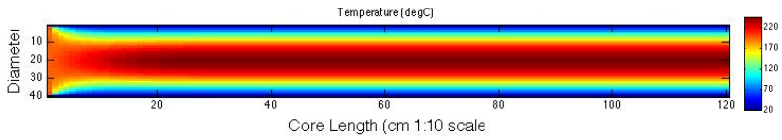


(b)

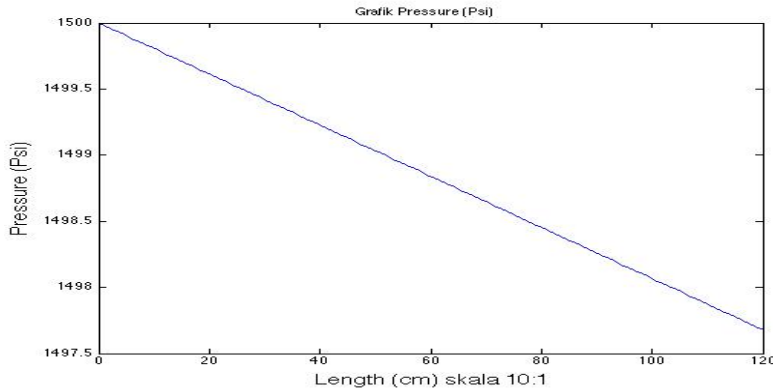
**Gambar 4. 5.** (a) Pada  $T_{inlet}$   $250^{\circ}\text{C}$  grafik *temperature* menunjukkan besar  $T_{outlet}$   $248.42^{\circ}\text{C}$  pada titik 12 cm. (b) Pada  $P_{inlet}$  1250 psi grafik *pressure* menunjukkan besar  $P_{outlet}$  1247.44 psi



**Gambar 4. 6.** (a) Pada  $T_{inlet}$   $250^{\circ}\text{C}$  grafik *temperature* menunjukkan besar  $T_{outlet}$   $245.7^{\circ}\text{C}$  pada titik 12 cm. (b) Pada  $P_{inlet}$  1000 psi grafik *pressure* menunjukkan besar  $P_{outlet}$  985.06 psi

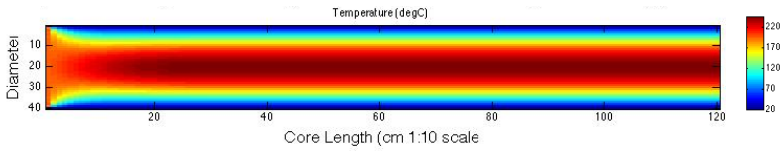


(a)

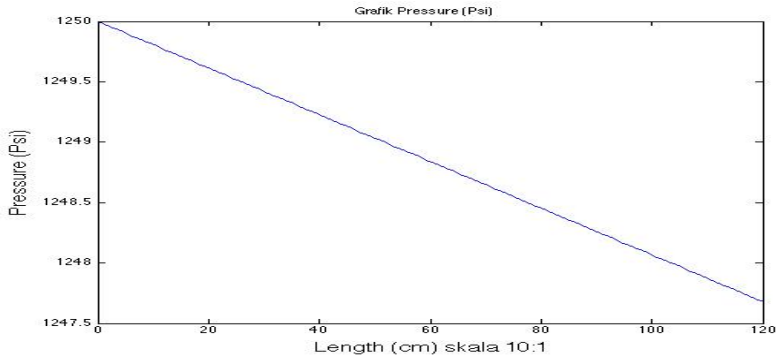


(b)

**Gambar 4. 7.** (a) Pada  $T_{inlet}$   $200^{\circ}\text{C}$  grafik *temperature* menunjukkan besar  $T_{outlet}$   $196.55^{\circ}\text{C}$  pada titik 12 cm. (b) Pada  $P_{inlet}$  1500 psi grafik *pressure* menunjukkan besar  $P_{outlet}$  1497.70 psi

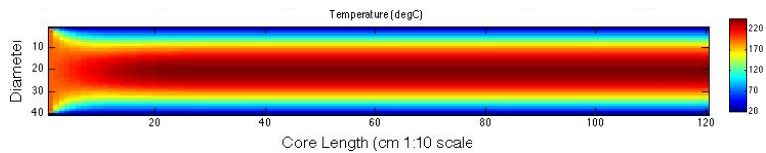


(a)

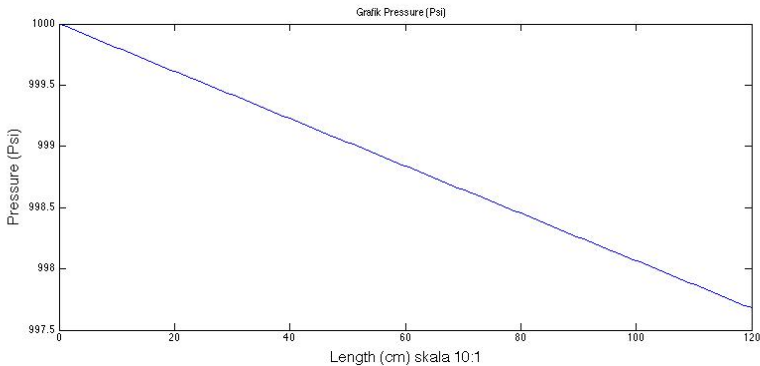


(b)

**Gambar 4. 8.** (a) Pada  $T_{inlet}$   $200^{\circ}\text{C}$  grafik *temperature* menunjukkan besar  $T_{outlet}$   $196.42^{\circ}\text{C}$  pada titik 12 cm. (b) Pada  $P_{inlet}$  1250 psi grafik *pressure* menunjukkan besar  $P_{outlet}$  1247.70 psi



(a)



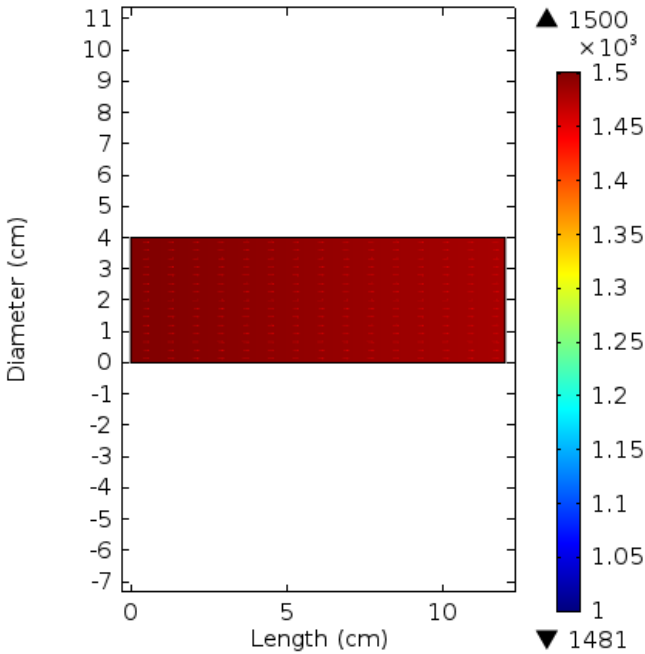
(b)

**Gambar 4. 9.** (a) Pada  $T_{inlet}$   $200^{\circ}\text{C}$  grafik *temperature* menunjukkan besar  $T_{outlet}$   $196.35^{\circ}\text{C}$  pada titik 12 cm. (b) Pada  $P_{inlet}$  1000 psi grafik *pressure* menunjukkan besar  $P_{outlet}$  997.67 psi

Dengan simulasi *lattice boltzmann* dapat dilihat bahwa perbedaan *pressure* dan *temperature* tidak berbeda jauh antara *inlet* dan *outlet* dikarenakan pendeknya jarak *core* yang di uji coba.

#### 4.2. Hasil Simulasi COMSOL

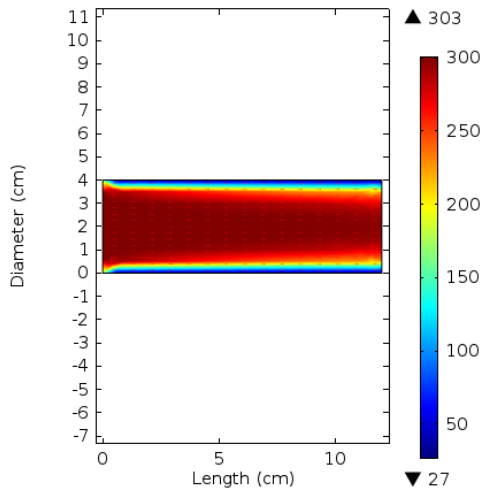
Input disesuaikan berdasarkan tabel *inlet pressure* dan *temperature* yang ada pada Tabel 3.1. Model dilakukan 9 kali dengan input nilai inlet yang berbeda-beda. Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 adalah 1 sampel hasil dari model COMSOL untuk  $P$  dan *temperature*.



**Gambar 4. 10.** Pada  $T_{inlet}$  300°C dan  $P_{inlet}$  1500 psi grafik *pressure* menunjukkan penurunan dengan besar  $P_{outlet}$  1481.2 psi

Gambar 4.10 merepresentasikan penurunan tekanan pada *porous medium* dengan fluide *steam*, pada COMSOL warna dipergunakan untuk memberikan gambaran nilai *pressure* yang ada pada tiap titik *length* di *porous medium* tersebut. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.10 bagian bawah merepresentasikan panjang *porous medium* atau *length*, sisi kiri yaitu *diameter porous medium*, dan sisi kanan menunjukkan *gradient* warna besar *pressure*.





**Gambar 4. 11.** Pada  $T_{inlet}$  300°C dan  $P_{inlet}$  1500 psi grafik *temperature* menunjukkan penurunan dengan besar  $T_{outlet}$  297.49°C

Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 merepresentasikan perpindahan fluida yang menggambarkan penurunan *temperature* dan *pressure* yang di gambarkan dengan *gradient* warna. *Gradient* warna pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 tergambarkan dengan warna merah untuk 1500 psi dan biru 1000 psi, sedangkan *temperature* warna merah merepresentasikan suhu 300°C dan warna biru merepresentasikan suhu 50°C.

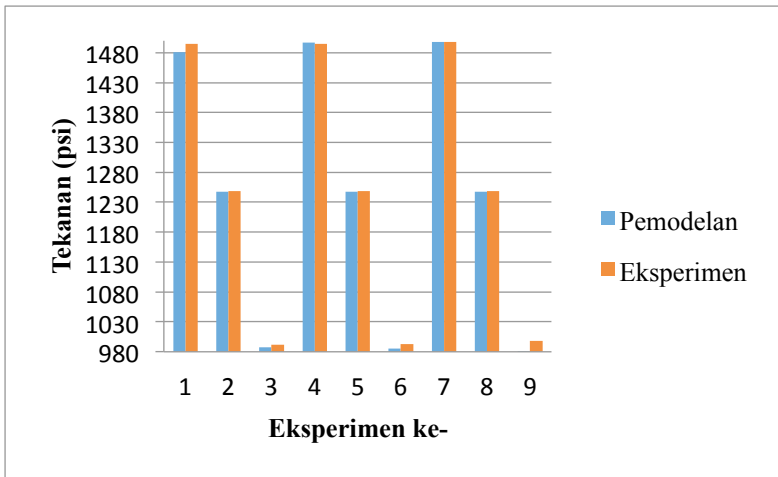
#### 4.3. Validasi Model dengan Eksperimen

Adapun hasil validasi antara eksperimen pada *core holder* dan mesin *steam injection*, dapat dilihat pada Tabel 4.1.

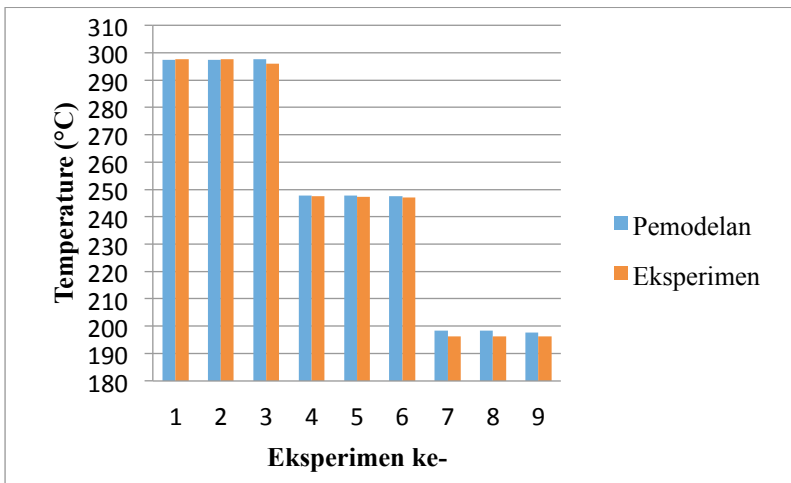
**Tabel 4. 1.** Validasi model dengan eksperimen

No. Eksperimen	<i>Lattice Boltzmann</i>		<i>COMSOL multiphysics</i>		Eksperimen pada <i>Core Holder</i>	
	T (°C)	P (psi)	T (°C)	P (psi)	T (°C)	P (psi)
1	279.7	1497.1	297.4	1481.2	297.7	1494.5
2	276.1	1247.2	297.4	1247.1	297.7	1248.2
3	275.5	987.3	297.5	987.5	295.9	992.3
4	248.4	1497.4	247.8	1497.4	247.6	1495.2
5	248.4	1247.4	247.7	1247.4	247.4	1248.8
6	245.7	985.1	247.6	985.2	247.1	993.1
7	196.5	1497.7	198.3	1497.8	196.4	1497.7
8	196.4	1247.7	198.4	1247.7	196.3	1249.1
9	196.3	997.6	197.7	981.2	196.3	998.4

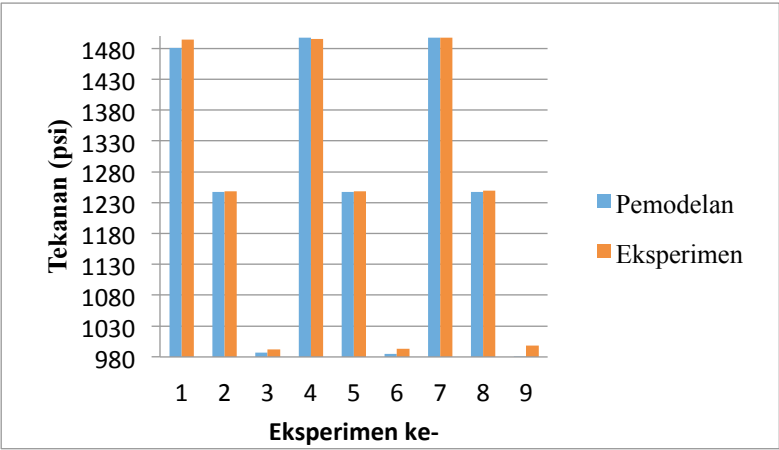
Dapat dilihat pada perbandingan Tabel 4.1 bahwa perbedaan *temperature* paling besar terjadi pada metode *lattice Boltzmann* ketika *temperature inlet* sebesar 300°C, dimana *temperature outlet* pada metode *lattice Boltzmann* sebesar 276.1°C yang dibandingkan dengan *temperature outlet* eksperimen 297.7°C, sehingga error yang terjadi adalah 21.6°C atau sebesar 7.24%, hal ini disebabkan karena pengaruh *boundary* suhu yang tidak bisa disesuaikan dengan kondisi *core holder*. Untuk tekanan, *error* terbesar terjadi pada tekanan *inlet* sebesar 1000 psi, error MATLAB dengan comsol sebesar 8 psi atau sebesar 0.91 %, hal ini disebabkan factor *boundary* juga pada 2 perangkat lunak tersebut, tetapi untuk hasil dari keduanya, *lattice Boltzmann* memiliki rata-rata error sebesar 2.41% sedangkan COMSOL sebesar 0.45%, hal ini dikarenakan mekanisme COMSOL lebih baik yang sudah diteliti dan diperhalus sistemnya dengan sangat detil. Gambar 4.12 - 4.15 adalah penjelasan lebih rinci dengan grafik *histogram* mengenai perbandingan *inlet* dan *outlet temperature*.



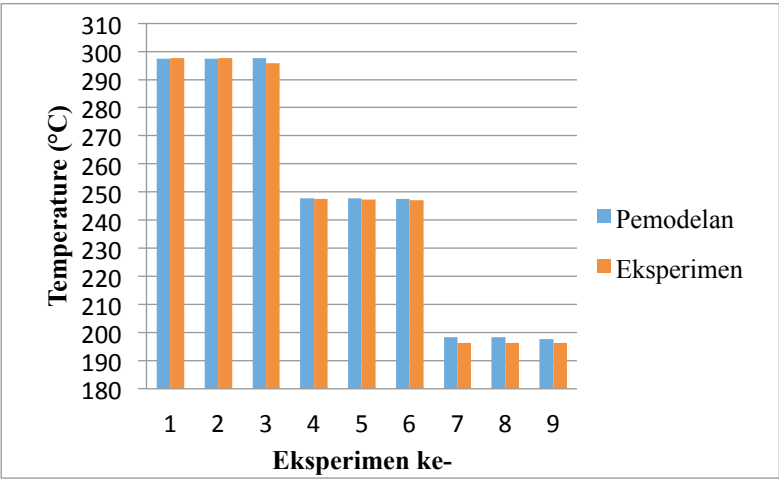
**Gambar 4. 12.** Grafik perbandingan pemodelan dan eksperimen *pressure* pada *lattice boltzman*



**Gambar 4. 13.** Grafik perbandingan pemodelan dan eksperimen *temperature* pada *lattice boltzmann*



**Gambar 4. 14.** Grafik perbandingan pemodelan dan eksperimen *pressure* pada COMSOL



**Gambar 4. 15.** Grafik perbandingan pemodelan dan eksperimen *temperature* pada COMSOL

Gambar 4.13 – 4.15 menggambarkan perbandingan besar *pressure* dan *temperature outlet* antara model dan eksperimen,

tujuannya adalah mengetahui perbedaan *output* dihasilkan, dan memberikan gambaran pada pembaca apakah model valid atau tidak. Perbandingan pada gambar dituliskan dengan *temperature* atau *pressure* di sisi kiri, dan nomor eksperimen dari 1 sampai 9. Pada proses validasi ini, setelah model di lihat hasil perbandingannya, *error* dari tiap model terhadap eksperimen juga di cari agar mengetahui besar *error* yang nantinya dapat digunakan sebagai referensi pembaca yang akan menggunakan model ataupun *perangkat lunak* COMSOL ini. Proses pencarian *error* ini didapatkan dengan menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE). RMSE dari proses validasi pada Gambar 4.12 hingga 4.15 tertuliskan hasil RMSE pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 2.** Tabel *Root Mean Square Error* (RMSE) antara pemodelan dan eksperimen

No. Eksperimen	<i>Error (%) pada –</i>			
	<i>T lattice boltzmann</i>	<i>P lattice boltzmann</i>	<i>T COMSOL</i>	<i>P COMSOL</i>
1	6.03	0.90	0.21	13.3
2	6.06	1.35	0.30	1.08
3	5.73	1.13	1.69	4.79
4	0.44	0.94	0.27	2.20
5	0.36	1.41	0.39	1.40
6	1.80	1.21	0.54	7.82
7	0.23	1.12	1.96	0.10
8	0.43	1.46	2.11	1.40
9	1.10	1.74	1.44	17.12
<i>Root Mean Square Error (RMSE)</i>	1.23	0.62	0.22	0.24

Tabel 4.2 menjelaskan perbandingan *error* antara model *lattice boltzmann* dengan data eksperimen dan perangkat lunak COMSOL dengan data eksperimen. Dari Tabel 4.2 dapat dilihat

bahwa RMS *error* terbesar terjadi pada *temperature* di metode *lattice Boltzmann* sebesar 1.23% hal inilah yang mengindikasikan kepada pembaca apabila ingin menggunakan model untuk mensimulasikan PVT *steam injection* pada *core* ataupun *reservoir*.

#### 4.4. Hasil *Sensitivity Analysis* terhadap Variabel *Length*, *Porosity*, dan *Permeability*

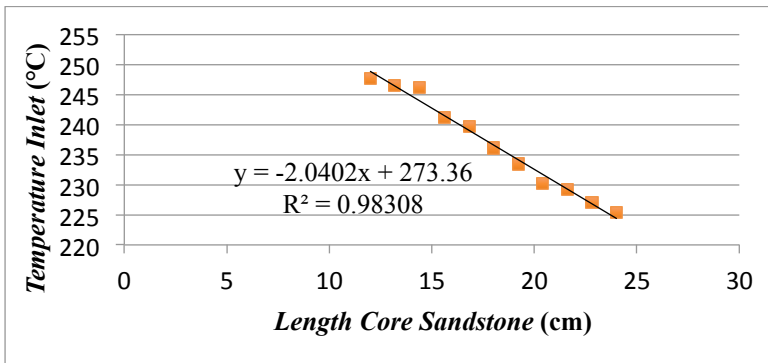
Dari hasil *pressure outlet* dan *temperature outlet*, *sensitivity analysis* dibuat dengan *growth* dari 10% sampai 100%. Hasil penurunan *temperature* dan *pressure* untuk tiap input *temperature* dan *pressure* hasil *sensitivity analysis* dapat dilihat pada Tabel 4.3.

**Tabel 4. 3.** Tabel *sensitivity analysis* terhadap pertambahan *length*.

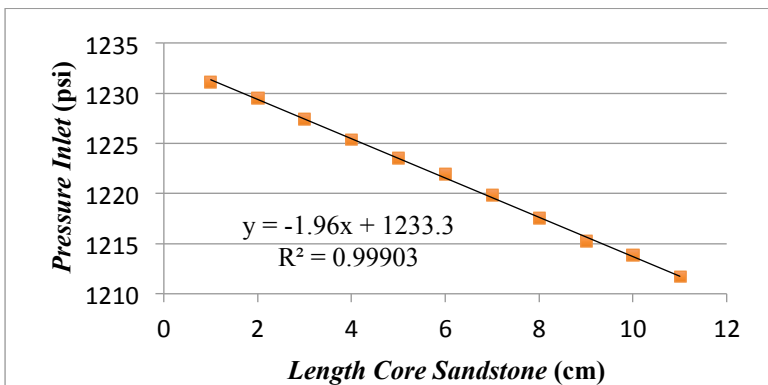
SENSITIVITY ANALYSIS							
G. %	Length (cm)	T outlet (°C)			P inlet (psi)		
		T inlet (°C) 300.0	T inlet (°C) 250.0	T inlet (°C) 200.0	P inlet (psi) 1500.0	P inlet (psi) 1250.0	P inlet (psi) 1000.0
0	12.0	297.4	247.8	198.3	1481.2	1231.1	981.0
10	13.2	296.0	246.6	197.6	1479.0	1229.5	979.1
20	14.4	295.9	246.3	197.4	1477.2	1227.4	977.2
30	15.6	289.2	241.1	192.8	1475.5	1225.4	975.3
40	16.8	288.5	239.7	192.4	1473.5	1223.5	973.4
50	18.0	282.8	236.1	189.5	1471.7	1221.9	971.5
60	19.2	282.0	233.5	188.6	1469.7	1219.8	969.6
70	20.4	280.3	230.2	186.4	1467.5	1217.5	967.5
80	21.6	279.1	229.2	185.2	1465.4	1215.3	965.6
90	22.8	277.8	227.1	184.7	1463.2	1213.8	963.4
100	24.0	275.8	225.4	182.5	1461.3	1211.7	961.2

Huruf G yang ada pada pojok kiri atas adalah *growth* yaitu kenaikan persentase variabel *sensitivity analysis*, warna merah menunjukan variabel *sensitivity analysis length*, warna biru menunjukan *temperature outlet* dari simulasi COMSOL, warna

oranye menunjukkan *pressure outlet* dari simulasi COMSOL, dan warna ungu menunjukkan property yang digunakan dalam *sensitivity analysis*. Tabel 4.3 memperlihatkan perubahan penurunan *temperature* dan *pressure* dengan *growth length* 10% dan panjang awal 12 cm. Dari tabel ini dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya panjang, *temperature* dan *pressure* akan menurun dikarenakan area yang dilalui fluida semakin panjang, pertambahan ini akan lebih jelas dengan melihat grafik penurunan *pressure* dan *temperature* pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17.



**Gambar 4. 16.** Grafik *sensitivity analysis temperature* dengan *length*



**Gambar 4. 17.** Grafik *sensitivity analysis pressure* dengan *length*

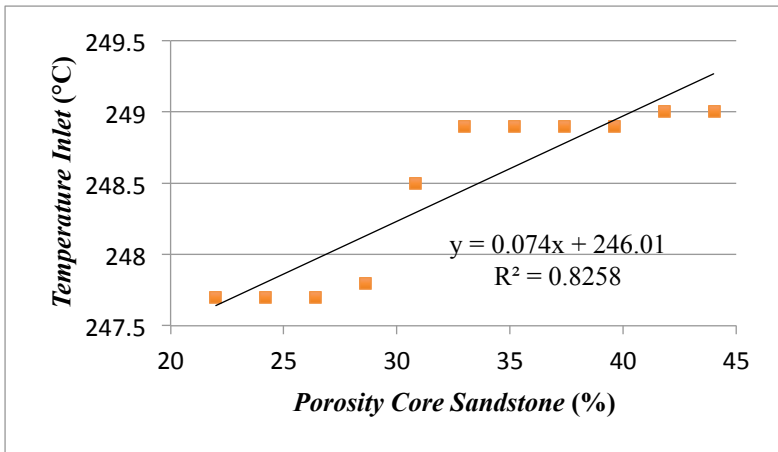
Tabel dan gambar ini berguna nantinya sebagai panduan pembaca untuk melihat *sensitivity pressure* dan *temperature* dengan persentase pertambahan panjang tertentu. Pada grafik didapatkan besar *sensitivity length* untuk *pressure* adalah -1.96 psi sedangkan *temperature* adalah -2.04°C.

**Tabel 4. 4.** Tabel *sensitivity analysis* terhadap pertambahan besar *porosity*

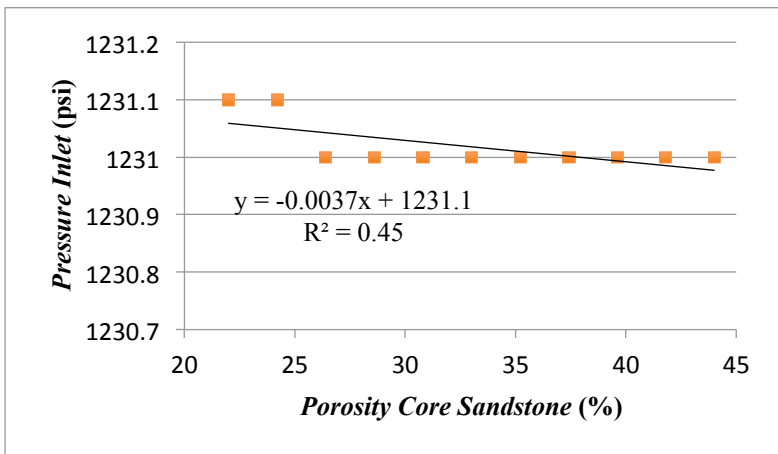
SENSITIVITY ANALYSIS							
G. (%)	Porosity (%)	T outlet (°C)			P inlet (psi)		
		T inlet (°C) 300.0	T inlet (°C) 250.0	T inlet (°C) 200.0	P inlet (psi) 1500.0	P inlet (psi) 1250.0	P inlet (psi) 1000.0
0	22.0	297.4	247.8	198.3	1481.2	1231.1	981.0
10	24.2	297.3	247.7	198.2	1481.0	1231.1	981.0
20	26.4	297.2	247.7	198.3	1481.0	1231.0	981.0
30	28.6	297.3	247.8	198.2	1481.0	1231.0	981.0
40	30.8	298.7	249.0	199.2	1481.0	1231.0	981.0
50	33.0	298.7	248.9	199.2	1481.0	1231.0	981.0
60	35.2	298.7	248.9	199.2	1481.0	1231.0	981.0
70	37.4	298.7	248.9	199.2	1481.0	1231.0	981.0
80	39.6	298.8	248.9	199.2	1481.0	1231.0	981.0
90	41.8	298.8	249.0	199.2	1481.0	1231.0	981.0
100	44.0	298.8	249.0	199.3	1481.0	1231.0	981.0

Dari Tabel 4.4 digambarkan perubahan penurunan *temperature* dan *pressure* dengan *growth porosity* 10% dan *porosity* awal 22%. *Porosity* ini adalah *porosity core sandstone* yang menjadi objek penelitian. Dari tabel ini dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya *porosity*, *temperature* dan *pressure* tidak terlampaui jauh penurunannya ini dikarenakan jarak yang dilalui fluida tidak terlalu besar, dan hanya variabel *porosity* saja yang diubah tanpa mengubah variabel lain seperti *velocity*.





**Gambar 4. 18.** Grafik *sensitivity analysis temperature* dengan *porosity*



**Gambar 4. 19.** Grafik *sensitivity analysis pressure* dengan *porosity*

Tabel dan gambar ini berguna nantinya sebagai panduan pembaca untuk melihat *sensitivity pressure* dan *temperature* dengan persentase pertambahan *porosity* tertentu. Pada grafik didapatkan besar *sensitivity porosity* untuk *pressure* adalah -

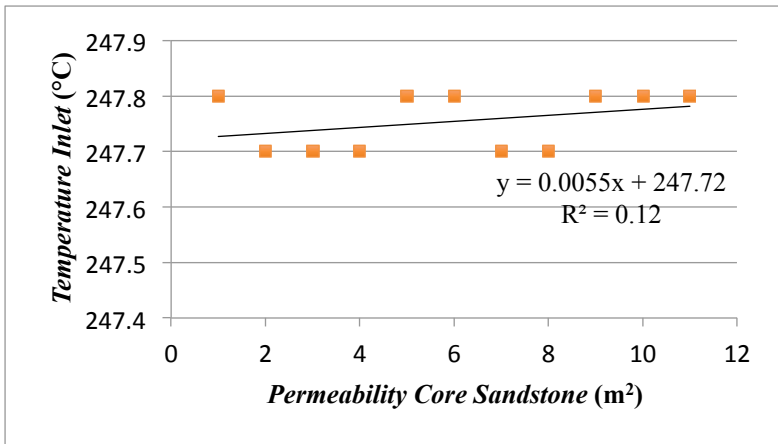
0.0037 psi sedangkan *temperature* adalah 0.074°C. Dari Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 dapat ditarik kesimpulan bahwa model COMSOL pada *temperature* dan *pressure* tidak *sensitive* terhadap *porosity*.

**Tabel 4. 5.** Tabel *sensitivity analysis* terhadap pertambahan besar *permeability*

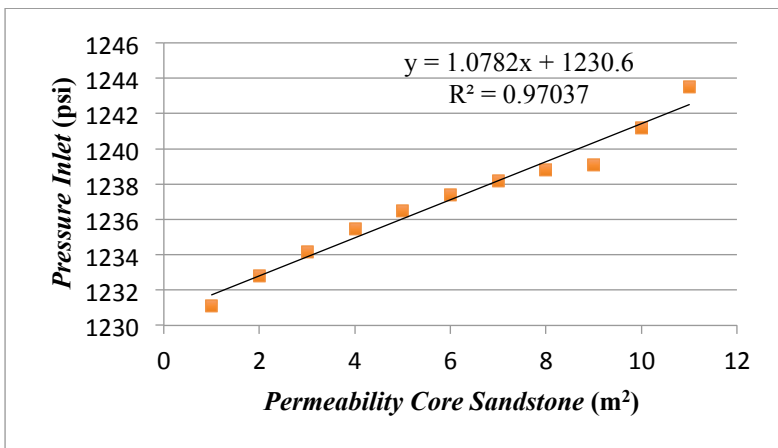
SENSITIVITY ANALYSIS							
G. (%)	Permeability (m <sup>2</sup> )	T outlet (°C)			P inlet (psi)		
		T inlet (°C) 300.0	T inlet (°C) 250.0	T inlet (°C) 200.0	P inlet (psi) 1500.0	P inlet (psi) 1250.0	P inlet (psi) 1000.0
0	1.20x10 <sup>-12</sup>	297.4	247.8	198.3	1481.2	1231.1	981.0
10	1.32x10 <sup>-12</sup>	297.2	247.7	198.2	1482.8	1232.8	982.7
20	1.44x10 <sup>-12</sup>	297.2	247.7	198.2	1484.2	1234.2	984.2
30	1.56x10 <sup>-12</sup>	297.2	247.7	198.2	1485.5	1235.5	985.4
40	1.68x10 <sup>-12</sup>	298.7	247.8	199.2	1486.5	1236.5	986.4
50	1.80x10 <sup>-12</sup>	298.7	247.8	199.2	1487.4	1237.4	987.3
60	1.92x10 <sup>-12</sup>	298.7	247.7	199.2	1488.2	1238.2	988.1
70	2.04x10 <sup>-12</sup>	298.7	247.7	199.2	1488.8	1238.8	988.8
80	2.16x10 <sup>-12</sup>	298.8	247.8	199.2	1490.0	1239.1	990.0
90	2.28x10 <sup>-12</sup>	298.8	247.8	199.2	1491.2	1241.2	991.2
100	2.40x10 <sup>-12</sup>	298.8	247.8	199.3	1493.4	1293.5	993.5

Dari Tabel 4.5 digambarkan perubahan penurunan *temperature* dan *pressure* dengan *growth permeability* 10% dan *permeability* awal 1.20x10<sup>-12</sup>. *Permeability* ini adalah *permeability core sandstone* yang menjadi objek penelitian. Dari tabel ini dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya *permeability*, *temperature* tidak terlalu terpengaruh, sehingga fluktuasi perubahan nilai *temperature* tidak berubah terlalu jauh, hal ini dikarenakan efek dari *permeability* tidak terlalu besar terhadap perpindahan panas pada *porous medium*. Untuk *pressure* terjadi perubahan yaitu kenaikan nilai *pressure outlet* pada batuan, hal ini disebabkan dengan semakin besarnya nilai *permeabilitas*

fluida akan semakin mudah mengalir, dengan besarnya nilai *permeabilitas* nilai *pressure drop* akan mengecil sehingga membuat *pressure outlet* pada batuan menjadi lebih besar.



**Gambar 4. 20.** Grafik *sensitivity analysis temperature* dengan *permeability*



**Gambar 4. 21.** Grafik *sensitivity analysis pressure* dengan *permeability*

Tabel dan gambar ini berguna nantinya sebagai panduan pembaca untuk melihat *sensitivity pressure* dan *temperature* dengan persentase pertambahan *permeability* tertentu. Pada grafik didapatkan besar *sensitivity permeability* untuk *pressure* adalah 1.078 psi sedangkan *temperature* adalah 0.0055°C. Dari Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 dapat ditarik kesimpulan bahwa model COMSOL pada *temperature* tidak *sensitive* terhadap *permeability*, sedangkan *pressure* mengalami kenaikan dengan pertambahan *permeability*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhong, L., Zhang, S., Wu, F., Lang, B., and Liu, H. "Improved Heavy-Oil Recovery by Separated-Zones Horizontal-Well Steam Stimulation,".
- [2] Gunadi, B. "Experimental and Analytical Studies of Cyclic Steam Injection Using Horizontal Wells," *Texas A&M University*, 1999.
- [3] Boberg, T.C. "Calculation of the Production Rate of a Thermally Stimulated Well,". *Journal of Petroleum Technology* 18.12. pp. 345-348. 1966.
- [4] Gael, B. T., E. S. Putro, and Akmal Masykur. "Reservoir management in the Duri steamflood." *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*. Society of Petroleum Engineers, 1994.
- [5] Bashar, A. A., "Modeling of Cyclic Steam Stimulation in A Reservoir: A Case Study of A Sudanese Reservoir," *Sudan University of Science and Technology*, 2010.
- [6] Kutay, E. M. "Modeling Moisture Transport in Asphalt Pavements," *PhD Thesis*, 2005.
- [7] Kleinknecht, S. M. "Steam Injection Technique for In Situ Remediation of Chlorinated Hydrocarbons from Low Permeable Saturated Zones - Experiment and Numerical Approach," *Universitat Stuttgart - Institut fur Wasserbau*, 2011.
- [8] Avila, K., Moxei, D., Lozar, A., Avila, D., and Barkley, D., ""The Onset of Turbulence in Pipe Flow". vol. 333, pp. 192-196. 2011.
- [9] White, F. M. "Viscous Fluid Flow, 3rd edition,". New York, Academic Press. 2006.
- [10] Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H., and Huesbsch, W.W., "Fundamentals of Fluid Mechanics, 6th edition". WILEY. 2008.
- [11] Succi, S. "The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond". Oxford University Press. 2001.

- [12] MacNamara, G. R. and Zanetti, G., " Boltzmann Equation to Simulate Lattice Gas Automata", " vol. 61, no. 20, pp. 2332-2335. 1988.
- [13] Maier, R. Kroll, D., Kustovsky, Y., Davis, H. T., and Bernard, R., " "Simulation of Flow through Bead Packs Using the Lattice Boltzmann Method". *AIP Publishing LLC*, vol. 10, pp. 1-16. 1997.
- [14] Chirila, B. D. "Introduction to Lattice Boltzmann Methods,". Alfred Wegener Institute. 2010.
- [15] Begun, R. and Basil, M. A., "Lattice Boltzmann Method and Its Applications to Fluid Flow Problems," *Euro Journals Publishing Inc.* 2008.
- [16] Frisch, U. Hasslacher, B., and Pomeau, Y., " "Lattice Gas Automata for Navier-Stokes Equation", " *Physical Review Letters*, vol. 56, pp. 1505-1508. 1986.
- [17] Chapman, S. and Cowling, T. G., "The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases" *Cambridge University Library, New-York*, vol. 3rd edition, 1970.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan dari tugas akhir ini adalah:

Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Model *lattice boltzmann* dan COMSOL setelah dibandingkan didapatkan hasil *Root Mean Square Error* (RMSE) terbesar pada bagian temperature *Lattice Boltzmann* dengan RMSE sebesar 1.23%, hal ini disebabkan oleh banyak faktor, salah satunya *temperature boundary*, *time step*, iterasi, dll, sedangkan COMSOL memiliki error sebesar 0.45%, hal ini menunjukkan bahwa perangkat COMSOL lebih baik digunakan untuk memodelkan P dan T *steam injection*.
- Hasil validasi model dengan eksperimen didapatkan hasil RMSE untuk *temperature lattice boltzmann* sebesar 1.23% dan *pressure lattice boltzmann* 0.62%, sedangkan perangkat lunak COMSOL didapatkan RMSE untuk *temperature* sebesar 0.22% dan *pressure* sebesar 0.24%, dilihat dari perbedaan error antara model dan eksperimen terlampaui metode COMSOL lebih mendekati nilai eksperimen.
- Berdasarkan *sensitivity analysis*, karakteristik model didapatkan berdasarkan perubahan *length*, *pressure*, dan *temperature*. Hasil dari *sensitivity analysis* menunjukkan bahwa model COMSOL sensitif terhadap *permeability* untuk *pressure* dengan besar *sensitivity* 1.078 psi/m<sup>2</sup>, sedangkan terhadap *porosity*, COMSOL sensitif pada *temperature* dengan besar *sensitivity* 0.074°C/%*porosity*, dan untuk *length*, COMSOL sensitif pada *temperature* dan *pressure* dengan besar *sensitivity* -2.04°C/cm untuk *temperature*, dan -1.96 psi/cm untuk *pressure*.

## 5.2. Saran

Pertimbangan untuk menentukan *pressure* dan *temperature* pada proses simulasi *steam injection*, dibutuhkan faktor data yang sangat kuat terutama *heat transfer coefficient* yang dapat berubah seiring berubahnya *pressure* dan *temperature*. Untuk penelitian berikutnya alangkah baiknya jika, percobaan *steam injection* pada *core holder*, dapat ditentukan suhu *boundary* nya sehingga hasil temperatur dan *pressure* dapat didapatkan dengan hasil yang baik dan akurat. Selain itu, penelitian ini baik jika dilanjutkan untuk mengganti fluida yang di pakai pada *enhanced oil recovery* lebih beragam seperti CO<sub>2</sub>, *alkaline*, *polymer*, surfaktan, dll.



## BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis Andika Dwiparana Suherman Natawiria yang dilahirkan di kota Tasikmalaya pada tanggal 23 Maret 1993 dari ayah bernama Suherman dan ibu bernama Lilis Suhaerah. Penulis merupakan anak bungsu dari 2 bersaudara. Pada tahun 2005, penulis menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SD Karang Pawulang 3 Bandung. Pada tahun 2008 penulis menyelesaikan pendidikan tingkat menengah pertama di SMP Negeri 5 Bandung. Tahun 2011 penulis menyelesaikan pendidikan tingkat menengah atas di SMA Negeri 3 Bandung. Pada tahun 2015 ini, penulis mampu menyelesaikan gelar sarjana teknik di Program Studi S1-Teknik Fisika, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri (FTI), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Penulis berhasil menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Pemodelan Kondisi Operasi PVT Steam Injection Pada Proses Enhanced Oil Recovery dengan Metode Lattice Boltzmann dan COMSOL Software**”. Selama perkuliahan penulis pernah menjadi kepala departemen *Society of Petroleum Engineers* (SPE) ITS *student chapter*. Serta aktif pada lomba-lomba internasional seperti juara *social venture challenge* di Harvard World Model United Nation (HWMUN), Seoul, Korea Selatan, dan mendapat beberapa beasiswa dari Astra International dan Djarum Foundation. Selepas itu, penulis juga menjadi mahasiswa berprestasi 1 Teknik Fisika dan mahasiswa berprestasi 4 di ITS Surabaya. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui email [andikadwiparana@gmail.com](mailto:andikadwiparana@gmail.com).